

JOÃO BERNARDO L. MOREIRA DE CAMPOS

Caracterização da Esteira
de Bolhas

DEQ
FEUP
1987

Caracterização da Esteira de Bolhas Tubulares e sua Acção Misturadora

JOÃO BERNARDO LARES MOREIRA DE CAMPOS



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
FACULDADE DE ENGENHARIA DO PORTO

1 9 8 7

Caracterização da Esteira de Bolhas Tubulares e sua Acção Misturadora

TC-100

JOÃO BERNARDO LARES MOREIRA DE CAMPOS

TESE DE DOUTORAMENTO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE DO PORTO

DEQ

FEUP

66(043)/CAMJ/CAR

13138

PUBLICAÇÃO SUBSIDIADA PELO
INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICA

1987

SUMÁRIO

Bolhas de ar de volume elevado ao ascenderem em colunas de líquido de pequeno diâmetro adoptam uma forma aproximadamente cilíndrica, podendo ser designadas por bolhas tubulares ("slugs" em Inglês). Neste trabalho estuda-se o escoamento do líquido na zona imediatamente abaixo das bolhas tubulares, zona vulgarmente designada por esteira.

Foram usados vários métodos para determinar o regime de escoamento do líquido (turbulento ou laminar) na esteira, bem como para determinar alguns parâmetros que a caracterizam.

As esteiras turbulentas foram estudadas quer fotograficamente, quer medindo a mistura, por elas induzida, de um traçador em colunas de água. Fizeram-se estudos de mistura em colunas de 19 e 32 mm de diâmetro ($Re = 2900$ e 6300 respectivamente), injectando diferentes números de bolhas tubulares a diferentes cadências. O estudo fotográfico foi realizado numa coluna de 52 mm de diâmetro.

As esteiras laminares foram caracterizadas quer fotograficamente, quer medindo o transporte de um traçador por elas efectuado. O estudo fotográfico foi realizado em colunas de 19 e 52 mm de diâmetro enquanto o transporte foi medido numa de 19 mm. Em ambos os estudos foram utilizados líquidos com viscosidades cinemáticas compreendidas entre $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ e $4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

As esteiras de bolhas tubulares são também importantes no comportamento de colunas de borbulhamento a operarem em contínuo. Apresenta-se neste trabalho, um estudo sobre a expansão de colunas de borbulhamento a operarem com bolhas tubulares. Usaram-se colunas de diâmetros 19, 32, 52 e 100 mm e líquidos com viscosidades cinemáticas compreendidas entre $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e $7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Procurou-se relacionar este estudo com observações (citadas na literatura) sobre a expansão de leitos fluidizados a pressões elevadas.

A Meus Pais

A Minha Mulher

AGRADECIMENTOS

Ao concluir este trabalho desejo exprimir o meu apreço às várias pessoas que de algum modo contribuíram para a sua realização.

Nomeadamente quero manifestar o meu público agradecimento ao Prof. João Rui Guedes de Carvalho, supervisor desta tese de doutoramento, pela confiança depositada e pelo apoio que sempre me proporcionou.

Ao Doutor Francisco Freitas, do Departamento de Engenharia Mecânica, o meu agradecimento por me ter facultado a utilização de uma central óleo-hidráulica, indispensável para o estudo fotográfico realizado neste trabalho.

Aos meus colegas do corpo docente o meu obrigado por, com sobrecarga do seu trabalho, me terem possibilitado estar nestes últimos anos com dispensa de serviço docente.

Finalmente, uma palavra de gratidão para os meus familiares e amigos, pela ajuda discreta mas constante mantida ao longo destes anos.

INDICE

	Pág.
<u>CAPÍTULO 1</u> - Introdução	
<u>CAPÍTULO 2</u> - Alguns conceitos teóricos	
2.1 - Definições	8
2.2 - Introdução ao estudo dos mecanismos de mistura longitudinal	12
<u>CAPÍTULO 3</u> - Mistura provocada pelo escoamento de um líquido em torno de um "slug"	
3.1 - Introdução	22
3.2 - Forma do "slug" e escoamento do líquido na zona frontal (zona A)	24
3.2.1 - Forma do "slug"	24
3.2.2 - Distorção sofrida pelos elementos de fluídos situados inicialmente num plano de cota $z = H_1$, na zona de validade do escoamento potencial	31
3.3 - Estudo do escoamento na película de líquido entre a parede e o "slug" (Zona B)	37
3.3.1 - Introdução	37
3.3.2 - Tipo de regime	37
3.3.3 - Perfil de velocidade e espessura limite da película em escoamento laminar	38
3.3.4 - Perfil de velocidade e espessura limite da película em escoamento turbulento	42

	Pág.
3.3.5 - Distorção devida ao escoamento ao longo de uma coluna de parede malhada. Aproximação para a região lateral do "slug" considerando escoamen- to laminar	43
3.4 - Distorção sofrida pelos elementos de fluído, situados inicialmente num plano de cota $z = H_1$, devida ao esco- amento em torno do "slug"	51
3.5 - Conclusões	52
 CAPÍTULO 4 - Mistura longitudinal provocada pela esteira de "slugs" em coluna de água	
4.1 - Introdução	54
4.2 - Alguns aspectos teóricos	56
4.2.1 - Introdução à noção de mistura promovida pela esteira de "slugs"	56
4.2.2 - Introdução à noção de mistura provocada pela injecção dos "slugs"	60
4.2.3 - Detalhes adicionais para o estudo da mistura provocada pela passagem de "slugs"	65
4.3 - Descrição detalhada da simulação da mistura resultante da passagem de um conjunto de "sglus" numa coluna de água	72
4.3.1 - Tamanho da malha e critérios de verificação da precisão do método numérico	76

	Pág.
4.4 - Estudo experimental	78
4.4.1 - Escolha do corante	78
4.4.2 - Sistema de injeção do "slug"	79
4.4.3 - Distribuição inicial de corante	81
4.4.4 - Sistema de amostragem	82
4.4.5 - Modo de operação	84
4.4.6 - Análise espectrofotométrica	87
4.5 - Apresentação e discussão dos resultados experimentais -	
- comparação com os obtidos por simulação	89
4.5.1 - Experiências efectuadas injectando isolada-	
mento os "slugs"	89
4.5.2 - Experiências efectuadas com injeção dos	
"slugs" a cadências relativamente elevadas	102
4.6 - Análise dos resultados experimentais com base na e-	
quação de difusão (dispersão longitudinal)	109
4.7 - Conclusões	113
 CAPÍTULO 5 - Caracterização da esteira de "slugs" em lí-	
quidos viscosos e sua acção misturadora	
5.1 - Introdução	115
5.2 - Determinação do volume da esteira de "slugs" em lí-	
quidos viscosos	118
5.2.1 - Descrição da instalação experimental	119

	Pág.
5.2.2 - Descrição do modo de operação	122
5.2.3 - Apresentação de algumas das fotografias obtidas	124
5.2.4 - Método de análise das fotografias para ob- tenção dos volumes da esteira e do "slug"	125
5.2.5 - Apresentação e discussão dos valores encontra- dos para o volume da esteira	128
5.2.6 - Generalização dos valores encontrados para o volume da esteira numa coluna de 19 mm	134
5.3 - Visualização do escoamento do líquido na esteira da "slugs"	137
5.3.1 - Descrição da instalação experimental	140
5.3.2 - Descrição do modo de operação	141
5.3.3 - Apresentação e discussão dos resultados obtidos	142
5.4 - Transferência de líquido entre a esteira e o líquido circundante durante a ascensão do "slug"	144
5.4.1 - Descrição das instalações experimentais e mo- dos de operação	144
5.4.2 - Apresentação e discussão dos resultados experi- mental obtidos	148
5.5 - Conclusões	153

	Pág.
<u>CAPÍTULO 6</u> - Expansão de colunas de borbulhamento gás- -líquido e de leitos fluidizados, a operarem em regime de "slugging"	
6.1 - Introdução	156
6.2 - Alguns aspectos teóricos	158
6.2.1 - Colunas de borbulhamento gás-líquido	158
6.2.2 - Leitos fluidizados gás-sólido	165
6.2.3 - Colunas de borbulhamento de gás em suspensões de partículas	167
6.3 - Condições experimentais	168
6.3.1 - Colunas de borbulhamento gás-líquido	168
6.3.2 - Colunas de borbulhamento de ar em suspensões de partículas	170
6.3.3 - Leitos fluidizados gás-sólido a diferentes pressões	171
6.4 - Análise dos resultados experimentais	171
6.4.1 - Representação dos resultados	171
6.4.2 - Resultados obtidos em colunas com líquidos viscosos	172
6.4.3 - Resultados obtidos em colunas com água	175
6.4.4 - Resultados obtidos em suspensões de partí- culas em água	175
6.4.5 - Resultados obtidos em leitos fluidizados gás- -sólido	176

	Pág.
6.5 - Conclusões	178
<u>CAPÍTULO 7</u> - Conclusões	180
<u>APÊNDICE A</u>	
A.1 - Introdução	185
A.2 - Deslocamento sofrido por uma coluna de água, inicialmente em repouso, sujeita subitamente a uma pressão constante na sua base	186
A.2.1 - Perfil de velocidade	186
A.2.2 - Tempo de actuação de uma dada pressão P, de forma a produzir um deslocamento médio ΔH_B da coluna de líquido	189
A.2.3 - Deslocamento sofrido por um elemento de fluido em função da sua posição radial	191
A.3 - Deslocamento sofrido por uma coluna de água, inicialmente em regime de Poiseuille sob a acção de uma pressão constante, a qual é subitamente suspensa	193
A.3.1 - Perfil de velocidade	193
A.3.2 - Deslocamento sofrido por um elemento de fluido em função da sua posição radial	194
A.4 - Descrição do estudo experimental e apresentação dos resultados obtidos	195

	Pág.
A.5 - Expressão aproximada do avanço da coluna provocado pela injeção	196
A.6 - Expressão analítica que traduz aproximadamente o avanço da coluna provocado pela expansão do "slug" durante a subida	198
NOMENCLATURA	200
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	213
FIGURAS	218

CAPÍTULO I

Introdução

As colunas de borbulhamento gás-líquido (colunas em que o gás é disperso através da fase líquida) são utilizadas na indústria química para promover processos de absorção, por vezes acompanhados de reacção química na fase líquida (reactores de borbulhamento gás-líquido). É o que se passa em alguns dos processos mais conhecidos da indústria petroquímica, nomeadamente: processos de oxidação e hidrogenação de compostos orgânicos (por exemplo fabrico de ácido acético), entre outros - para uma mais completa documentação ver Shah et al. (1982).

Este tipo de reactor apresenta inúmeras vantagens:

- i) Simplicidade e baixos custos de operação
- ii) Facilidade de controlo do tempo de residência da fase líquida
- iii) Elevado grau de mistura da fase líquida, sem necessidade de se recorrer a processos de agitação mecânica.

Este último aspecto levou a que também em reactores líquido-líquido se passasse a utilizar o borbulhamento de gás, simplesmente com o intuito de promover uma mistura mais eficaz. Este processo é também muito atraente em fermentadores biológicos, já que a agitação mecânica conduz a uma grande degradação do material biológico.

Nas colunas de borbulhamento, o gás é normalmente introduzido na base, ou através de injectores, ou através de pratos perfurados, podendo ser observados, como refere Ulbrecht et al. (1981), vários regimes de fluxo. A velocidades superficiais do gás (U_G) reduzidas, bolhas praticamente

esféricas sobem na coluna, umas atrás das outras, formando longas filas em ascensão. A partir de $U_G \geq 0,3 \text{ mm/s}$, começa-se a notar a formação de bolhas instáveis, as quais vão oscilando ao mesmo tempo que sobem na coluna. Apesar do seu movimento oscilante, as bolhas ocupam uma zona central da coluna, usualmente designada por pluma, cujo raio está algures entre $0,1 R$ e $0,4 R$ (em que R representa o raio da coluna) consoante a velocidade superficial do gás. Quando U_G atinge cerca de 1 mm/s , a pluma torna-se ela própria instável, notando-se oscilações mais ou menos regulares no seu trajecto. Aumentando ainda mais a velocidade do gás, este trajecto torna-se helicoidal. Este comportamento é geralmente atribuído a mudanças periódicas da pressão hidrostática ao longo do raio da coluna. Quando a velocidade superficial atinge os 10 mm/s a pluma perde a identidade e toda a coluna fica repleta de bolhas. À medida que se aumenta a velocidade do gás, as bolhas começam a interactuar, passando a observar-se uma intensa coalescência, com consequente aumento da fracção de bolhas de maior tamanho. Para velocidades superficiais crescentes, a coalescência é tão intensa, logo acima da base da coluna, que se começa a notar a formação de bolhas de elevado tamanho que ocupam praticamente toda a secção recta da coluna (bolhas tubulares habitualmente designadas por "slugs"). É evidente, como frisaram Ulbrechet al. (1981), que os limites de velocidade superficial para cada zona dependem das propriedades físicas do líquido (em especial da sua viscosidade e tensão superficial), sendo os referidos aqueles que foram observados num sistema ar-água.

Voltando ao problema da mistura numa coluna de borbulhamento gás-líquido, a cada um dos regimes de fluxo descritos está associado um ou

vários mecanismos diferentes de mistura. A maioria dos estudos já realizados referem-se à zona de velocidade superficial do gás até 10 mm/s. Se bem que não será esta zona que vai merecer maior atenção nesta tese, convêm referir alguns dos aspectos mais focados sobre este assunto na literatura.

Em especial na gama de velocidades superficiais que conduz à formação de uma pluma central de bolhas e devido à diferença de densidade entre as duas zonas (zona central em grande fracção de gás e zona da parede com reduzida fracção de gás), notou-se a formação de correntes de convecção resultantes de uma intensa circulação do líquido. Durante a última década, vários investigadores estudaram quer experimentalmente, quer teoricamente, esta circulação. Foi por eles demonstrado que a velocidade de circulação dependia, além da velocidade superficial do gás e das propriedades físicas do líquido, da retenção do gás na coluna, do diâmetro equivalente e da velocidade de subida das bolhas.

Uma referência aos modelos hidrodinâmicos e aos modelos de mistura até agora desenvolvidos é feita por Joshi e Shah (1981). De seguida são citados os modelos de mistura referidos nesse trabalho:

- i) Modelo de turbulência isotrópica de Baird e Rice (1975)
- ii) Modelo de recirculação de Joshi (1980)
- iii) Modelo de tanques em série com recirculação de Joshi (1980).

Estes modelos apresentados para a mistura longitudinal da fase líquida, bem como a interpretação da grande maioria dos resultados experimentais existentes na literatura - ver Shah et al. (1982) - foram construí

Ídos em termos de um coeficiente de dispersão axial, D_L , baseado no modelo de dispersão/difusão a uma dimensão. A partir de um balanço material a uma "fatia" infinitesimal da coluna de altura dz , obtém-se:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = - \bar{U}_L \frac{\partial c}{\partial z} + D_L \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (1.1)$$

em que $\bar{U}_L$ é a velocidade superficial média da fase líquida.

Diferentes técnicas experimentais foram utilizadas para determinar o coeficiente de dispersão axial, D_L , nomeadamente:

i) Técnicas em estado não estacionário, em que se media a distribuição de concentração na coluna ao longo do tempo de um traçador subitamente introduzido na base e se obtinha D_L por resolução da equação (1.1).

ii) Técnicas em estado estacionário, em que se media o perfil de concentração longitudinal de um traçador continuamente alimentado à coluna e se resolvia a equação (1.1) com $\partial c / \partial t = 0$.

No que diz respeito à primeira técnica, Khang e Kothari (1980) apresentam no seu estudo um método gráfico de ajuste dos resultados experimentais à solução da equação (1.1), o qual à partida se apresenta como o processo mais expedito para determinar D_L .

A segunda técnica é apresentada com bastante pormenor por König et al. (1978).

Contudo em muitos destes estudos, a mistura e consequentemente o valor de D_L , não era só atribuída aos perfis que se desenvolviam na fase

líquida devido às correntes de circulação promovidas pelo gás. Alguns autores atribuíram também grande importância à mistura provocada pelas próprias bolhas em ascensão no líquido. Entre eles Riquarts (1981) demonstrou a importância na mistura, do transporte de líquido através de mecanismos de turbulência provocados pela subida das bolhas. Baird e Rice (1975) referiram igualmente este aspecto no seu modelo de turbulência isotrópica.

Ora, é neste ponto que se esboça o tema central desta tese. Se a ascensão de uma bolha provoca turbulência, comparando esta situação com a de um sólido colocado no meio de um fluído em escoamento - ver Schlichting (1968) - esta turbulência só pode estar localizada na parte posterior da bolha, região usualmente designada por esteira.

Para estudar a acção misturadora da esteira de uma bolha, pensou-se em escolher uma situação em que todos os parâmetros já referidos como importantes na mistura, nomeadamente circulação do líquido e padrão de escoamento das bolhas, tivessem uma acção diminuta quando comparada com a da esteira. Com este intuito optou-se por estudar a mistura provocada pela ascensão de bolhas tubulares (já designadas por "slugs"); com este tipo de bolhas não existem correntes de circulação de líquido na coluna e a além disso o seu padrão de escoamento é bem definido e conhecido. É ainda de prever que seja com este tipo de bolhas, não só pela sua dimensão mas também pelo facto de estarem confinadas a uma superfície sólida (parede da coluna), que a acção misturadora da esteira seja mais acentuada.

Para levar a cabo este estudo e sempre com o objectivo de realçar a acção da esteira, fizeram-se as seguintes opções experimentais:

i) O estudo experimental foi feito em colunas em que o movimento do líquido era só devido à introdução e subida do gás na coluna (na equação (1.1), $\bar{U}_L = 0$).

ii) O gás era introduzido através de um processo cadenciado de injeção, do qual resultava a formação de "slugs" sempre do mesmo tamanho, em oposição ao tradicional borbulhamento em contínuo, do qual resultava um espectro alargado de tamanhos de bolhas. Este processo de introdução do ar na coluna apresentava ainda a vantagem das bolhas poderem subir espaçadas e sem interagirem.

Fizeram-se estudos tanto para a mistura provocada pela esteira de "slugs" em água, como para a provocada pela esteira de "slugs" em líquidos viscosos

Com a finalidade de facilitar uma futura pesquisa, é referida de seguida a forma como esta tese se encontra estruturada.

No Capítulo 2 são focados alguns aspectos teóricos considerados importantes na compreensão dos capítulos seguintes.

No Capítulo 3 é apresentado um estudo sobre o escoamento de um líquido em torno de um "slug" em ascensão na coluna, bem como sobre a mistura resultante desse escoamento. É analisada a influência do diâmetro da coluna onde o "slug" se encontra em ascensão e da viscosidade do líquido, na mistura.

No Capítulo 4 é descrito o estudo da mistura longitudinal provocada pela passagem de N "slugs" de ar em água. É apresentada uma técnica ex

perimental que permite caracterizar (dimensão e estrutura) a esteira destes "slugs".

No Capítulo 5 é apresentado um estudo idêntico ao do capítulo anterior, mas para o caso de "slugs" a subirem em líquidos viscosos.

No Capítulo 6 é descrito um estudo sobre a expansão de colunas de borbulhamento, tanto de ar em água, como de ar em líquidos viscosos, a operarem em regime de "slugging". Os resultados obtidos são comparados com os citados na literatura para leitos fluidizados a alta pressão (igualmente a operarem em regime de "slugging").

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões mais relevantes de todo o trabalho e são dadas indicações para um trabalho futuro no âmbito desta tese.

Finalmente no Apêndice A, é descrito um estudo sobre o escoamento de uma coluna vertical de líquido, inicialmente em repouso, a qual entra subitamente em movimento, devido a uma alteração da pressão na sua base.

CAPÍTULO 2

Alguns conceitos teóricos

2.1 Definições

Neste capítulo introdutório interessa definir certos termos e apresentar alguma nomenclatura com vista a simplificar a redacção e leitura dos capítulos seguintes.

Quando uma bolha gasosa sobe num líquido (ou leito fluidizado) , normalmente apresenta-se com forma diferente da esférica. Define-se então o diâmetro equivalente da bolha, d_e , como o diâmetro da esfera que tem o mesmo volume, V_b , que a bolha:

$$d_e = \left(\frac{6 V_b}{\pi} \right)^{1/3} \quad (2.1)$$

Numa coluna cilíndrica que contenha um líquido ou um leito fluidizado, designar-se-á por D o respectivo diâmetro interno (por R o raio) e por H a altura de líquido ou leito fluidizado acima da base (distribuidor) na ausência de bolhas (ver Figuras 2.1). A área da secção recta da coluna

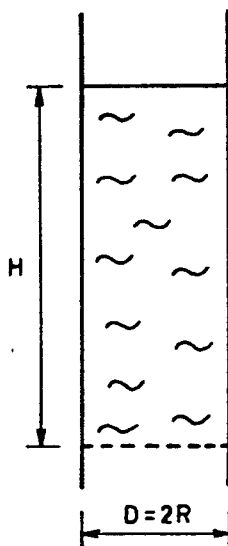


Figura 2.1 - Representação esquemática de uma coluna de líquido.

será designada por $A (= \pi D^2/4)$.

As bolhas em ascensão num tubo podem ter diâmetro $d_e < D$ e nesse caso chamar-se-ão simplesmente bolhas (ver Figura 2.2b) ou então $d_e \geq D$ chamando-se nesse caso bolhas tubulares ("slugs") (Figura 2.2a).

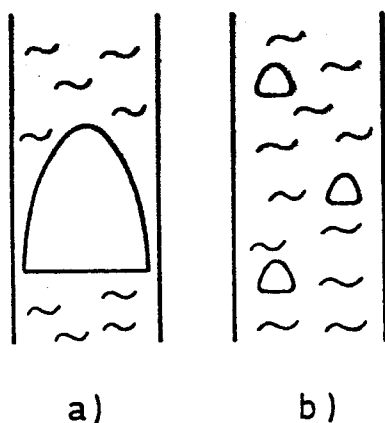


Figura 2.2 - Representação esquemática de bolhas: a) bolha tubular ("slug") ($d_e \geq D$); b) bolhas ($d_e < D$).

Os "slugs" têm uma forma alongada (como uma bala) e podem ser caracterizados pelo diâmetro D da coluna em que circulam, pelo respectivo comprimento L_s , pelo volume V_s ou ainda pela altura ΔH de líquido que deslocam (ver Figura 2.3). Note-se que como V_s varia com a pressão, o valor de ΔH para um dado "slug" num tubo vai depender da profundidade a que ele se encontra para uma mesma pressão à superfície. Salvo menção em contrário, os valores de ΔH referidos são sempre medidos com o "slug" junto da superfície livre, isto é, à pressão atmosférica.

Na caracterização mais detalhada de um "slug" e do movimento em seu redor, considerar-se-á frequentemente um referencial "preso" ao "nariz"

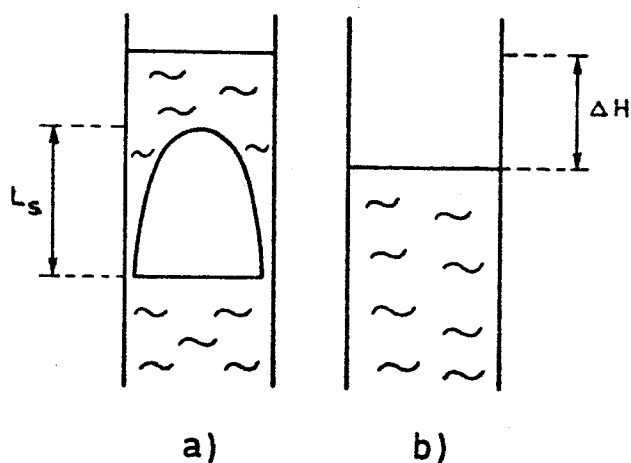


Figura 2.3 - Altura de líquido deslocado pelo "slug" (ΔH):

a) "slug" perto da superfície livre; b) após erupção do "slug" à superfície.

do "slug" (ponto 0 na Figura 2.4).

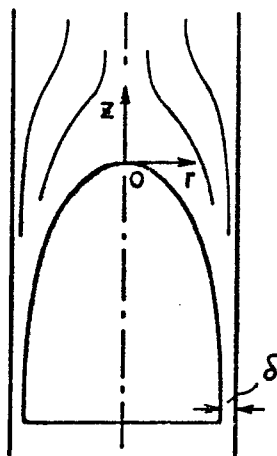


Figura 2.4 - Representação de um referencial de coordenadas "preso" ao "slug".

A superfície frontal do "slug" é aproximadamente esférica; para valores de z negativos, suficientemente grandes em módulo, a superfície lateral

ral do "slug" passa a cilíndrica, como se explicará à frente e designar-se-á por δ a espessura da camada de líquido entre o "slug" e a parede do tubo.

Associada a um "slug" existirá normalmente uma esteira onde o líquido se apresenta em recirculação. O movimento do líquido nesta esteira poderá ser mais ou menos ordenado e conseqüentemente o contorno da esteira será mais ou menos definido. Imaginando o contorno a tracejado na Figura 2.5, definem-se o comprimento L_e da esteira, o volume da esteira, V_e , correspondente ao líquido na zona de recirculação e o comprimento equivalente da esteira:

$$l_e = \frac{V_e}{(\pi D^2/4)} \quad (2.2)$$

que corresponde à altura de tubo com volume igual à esteira.

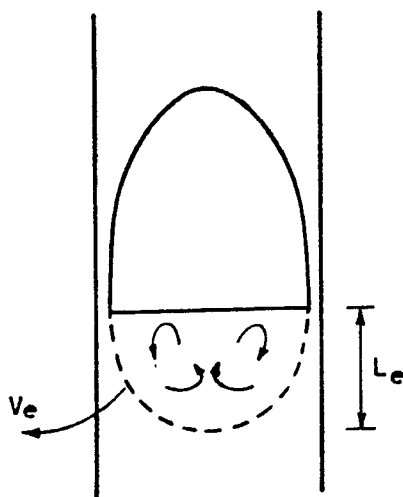


Figura 2.5 - Representação esquemática da esteira de um "slug".

A par do estudo de "slugs" isolados, considerar-se-ão borbulhamentos em contínuo, sendo então os caudais volumétricos de gás, Q_V , referidos à unidade de área de secção recta e designando-se a variável correspondente por velocidade superficial do gás

$$U_G = \frac{Q_V}{A} \quad (2.3)$$

2.2 Introdução ao estudo dos mecanismos de mistura longitudinal

O estudo da mistura longitudinal induzida pela ascensão de um "slug" numa coluna de líquido, é tratado nesta tese do ponto de vista fundamental, procurando-se identificar e quantificar os processos físicos responsáveis pela referida mistura. Neste capítulo faz-se uma abordagem qualitativa que permite a identificação dos mecanismos em jogo e para tal, interessa começar por "visualizar" o problema da mistura. Imagine-se que um tubo contém um líquido, o qual se encontra corado com concentração $c = c_0$ (de corante) acima do plano AA e concentração nula ($c = 0$) abaixo desse plano (ver Figura 2.6). O gráfico c função de z representa o perfil de concentração no tubo quando o "slug" ainda se encontra afastado de AA. Importa perceber o que acontece ao líquido após passagem do "slug" pelo plano AA. Consideremos várias situações ilustrativas:

(i) O "slug" não mistura o líquido.

Um caso limite (irrealista) seria o perfil ficar como na Figura 2.6b. Dir-se-ia então que o "slug" não teve qualquer acção misturadora.

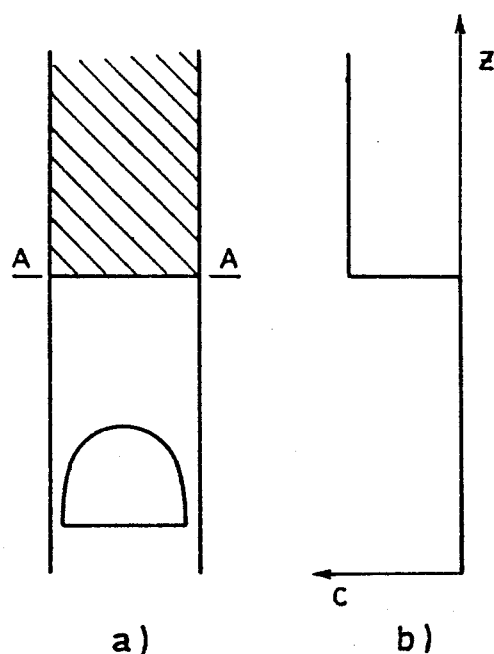


Figura 2.6 - a) Distribuição de soluto antes da passagem do "slug" pelo plano AA; b) Perfil de concentração antes da passagem do "slug" pelo plano AA.

Note-se aqui, como aparte importante para o que se segue, que quando se comparam perfis é automaticamente introduzida uma correcção ao volume de coluna ocupado pelo gás (efectivamente despreza-se o volume ocupado pelo gás, sendo apenas contabilizado o volume do líquido). Por outras palavras, a cota z não mede a distância real de um ponto ao distribuidor, mas sim, a distância de um ponto ao distribuidor após remoção de todas as bolhas existentes na coluna. Este aspecto percebe-se melhor, se considerarmos uma cota z' , distância real ao distribuidor e se tivermos em conta a configuração dos perfis $c(z)$ e $c(z')$, antes e depois da passagem do "slug" no plano AA, se o "slug" não provocar qualquer mistura (ver Figura 2.7).

(ii) O "slug" provoca mistura longitudinal e não há mistura radial.

Esta situação está representada na Figura 2.8. Note-se que ao traçar o perfil $c(z)$ nesta situação, toma-se em cada cota z a concentração média que resultaria, se se misturasse todo o líquido contido na secção rec

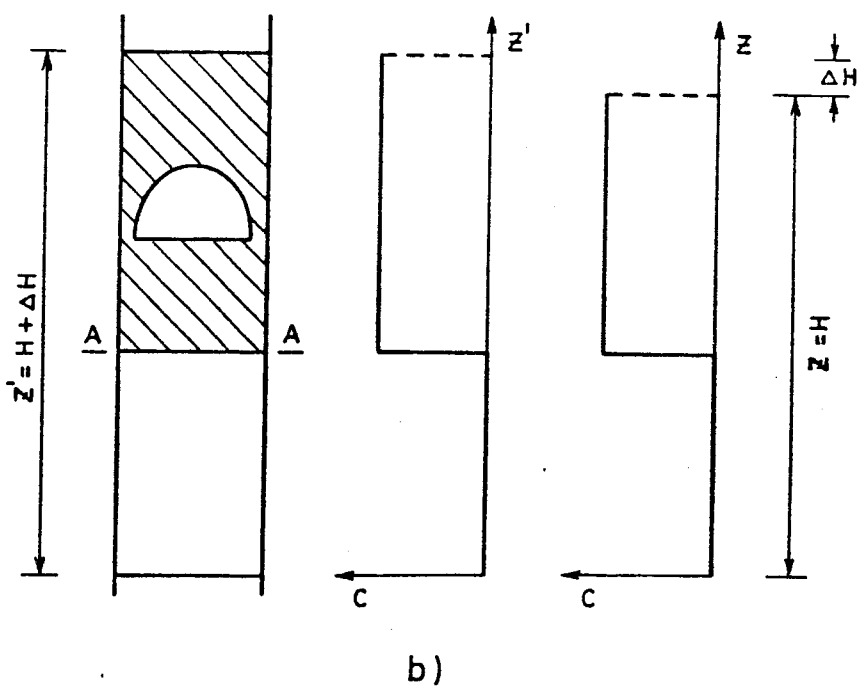
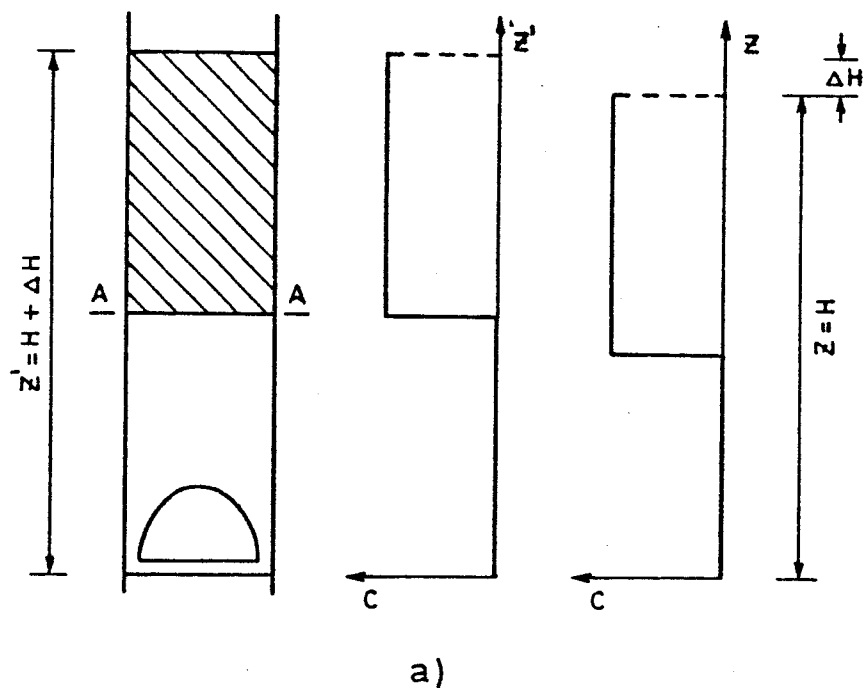


Figura 2.7 - Representação esquemática da correcção ao volume da coluna ocupada pelo gás: a) antes da passagem do "slug" pelo plano AA; b) após a passagem do "slug" pelo plano AA se não houvesse qualquer mistura.

ta a essa cota.

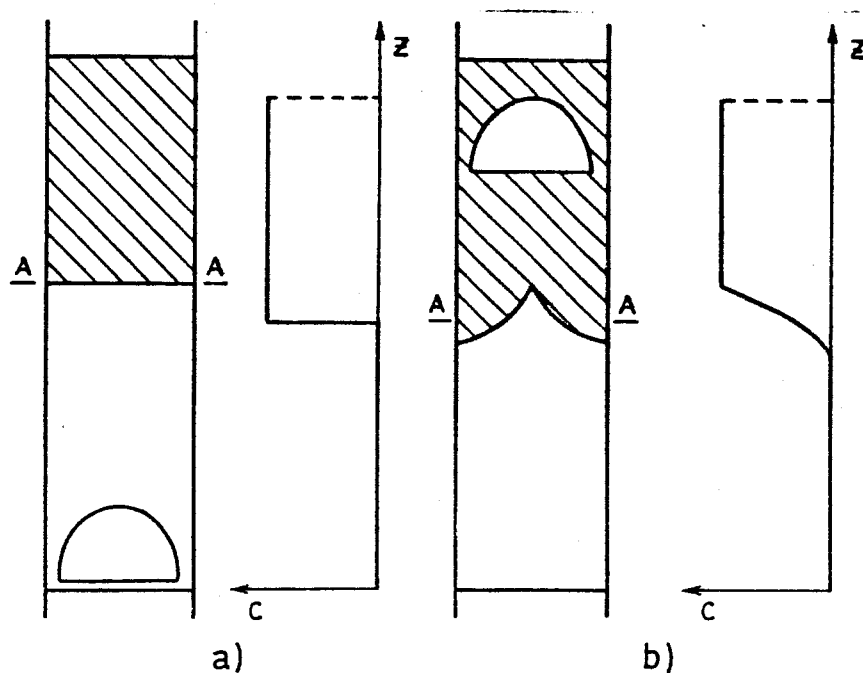


Figura 2.8 - Distribuição de soluto e respectivo perfil de concentração longitudinal supondo que não há mistura radial:
a) antes da passagem do "slug" pelo plano AA;
b) após passagem do "slug" pelo plano AA.

(iii) O "slug" provoca mistura longitudinal com mistura radial incompleta.

Esta situação está representada na Figura 2.9.

(iv) O "slug" provoca mistura longitudinal com mistura radial perfeita.

Esta situação está representada na Figura 2.10.

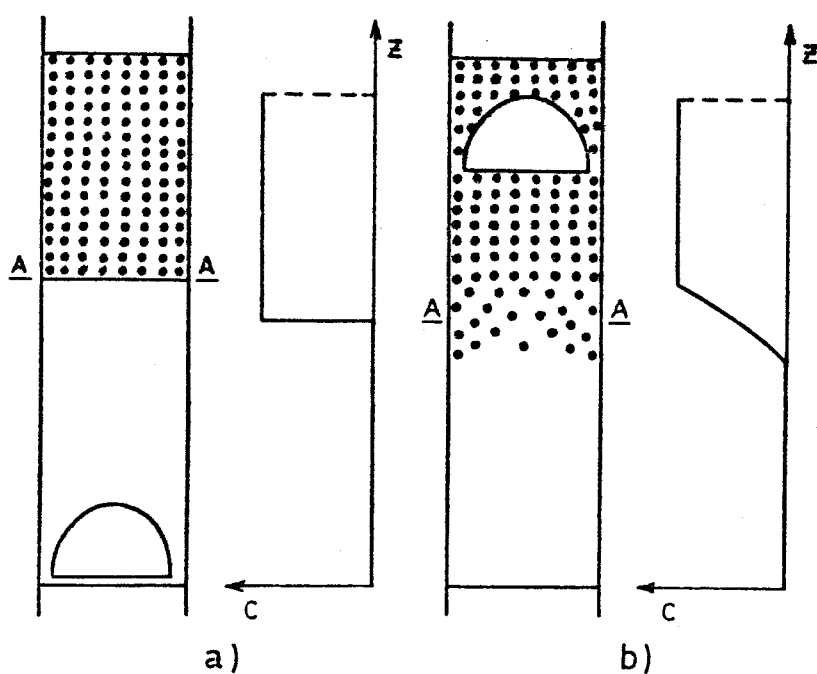


Figura 2.9 - Distribuição de soluto e respectivo perfil de concentração longitudinal supondo mistura radial incompleta:
 a) antes da passagem do "slug" pelo plano AA;
 b) após passagem do "slug" pelo plano AA.

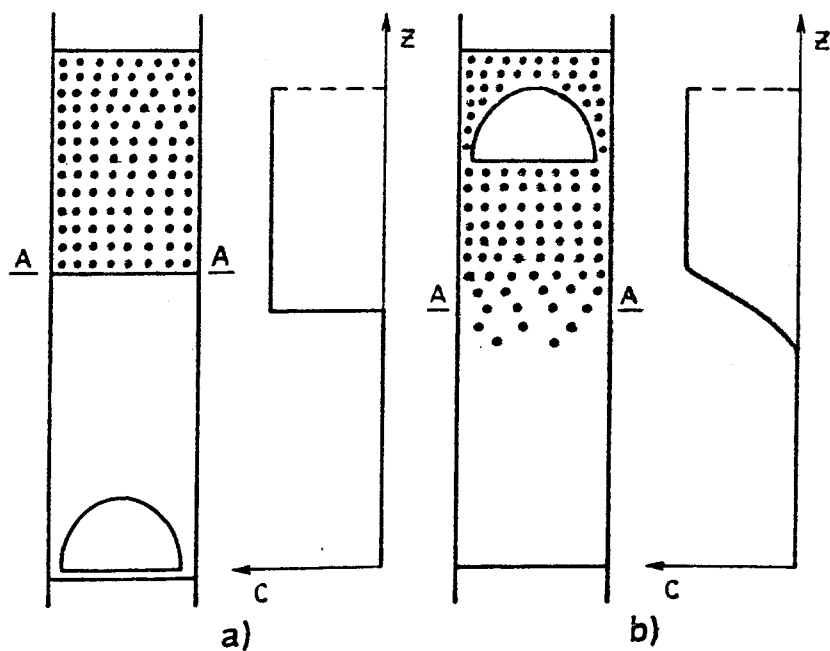


Figura 2.10 - Distribuição de soluto e respectivo perfil de concentração longitudinal supondo mistura radial perfeita:
 a) antes da passagem do "slug" pelo plano AA;
 b) após passagem do "slug" pelo plano AA.

No estudo experimental obtêm-se perfis de concentração $c(z)$ após passagem de um ou mais "slugs", importando aqui delinear os mecanismos que podem levar ao aparecimento dos perfis observados. Dividiu-se a apresentação destes mecanismos em três categorias:

A - Mistura devida ao escoamento nas regiões frontal e lateral do "slug".

A compreensão deste mecanismo pode ser facilitada pela consideração de uma série de 4 instantâneos consecutivos (ver Figura 2.11) no processo de ascensão do "slug" em relação ao plano (AA) de separação de líquido corado e não corado. O instantâneo (d) (i.e o 4º), é uma representação da configuração que se observaria após passagem e afastamento do "slug", se a esteira não tivesse qualquer influência no processo e não houvesse nenhuma mistura radial dos vários elementos de fluído. O perfil $c(z)$ resultante (ver Figura 2.11) pode ser visto de modo alternativo como uma curva $F(t)$, usando a nomenclatura de Danckwerts (1953), obtida por introdução de um degrau de concentração na alimentação de um "vaso" operando em contínuo a um caudal $(U_s \times A)$ em que U_s é a velocidade de subida de um "slug" isolado. O "vaso" aqui em estudo corresponde ao espaço compreendido entre a superfície do "slug" e a parede do tubo, desde o plano da base do "slug" (BB) até um plano um pouco para a frente do seu "nariz" (cerca de 1,5 D será suficiente). Note-se que a colocação exacta deste plano não é importante já que suficientemente à frente do "slug" e visto dum referencial preso a este, o escoamento é pistão.

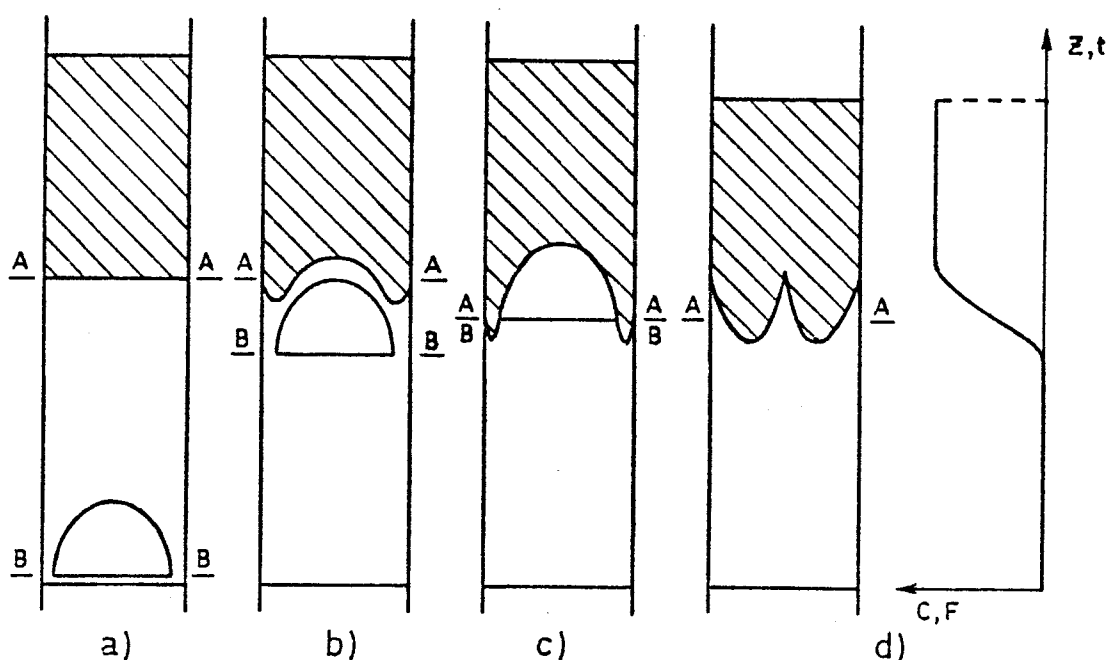


Figura 2.11 - Distribuição de soluto devido ao escoamento na zona frontal e lateral do "slug", supondo que não há mistura radial: a) "slug" na base da coluna; b) "slug" perto do plano AA; c) "slug" a atravessar o plano AA; d) após passagem do "slug" e respectivo perfil de concentração longitudinal.

B - Mistura devida ao escoamento na região da esteira

Como se focará mais à frente, para "slugs" em água a acção misturadora da esteira é considerável. A compreensão do fenómeno pode ser facilitada por meio de diagramas semelhantes aos usados anteriormente, mas em que se supõe, apenas para evidenciar melhor o fenómeno, que não há mistura do líquido na zona frontal e lateral do "slug", isto é, não há mistura até à sua entrada na esteira (ver Figura 2.12).

Uma análise deste mecanismo de mistura baseada na consideração de talhada do deslocamento dos vários elementos de fluido, não é sempre possível, pois as esteiras são frequentemente turbulentas. Tal como na análise

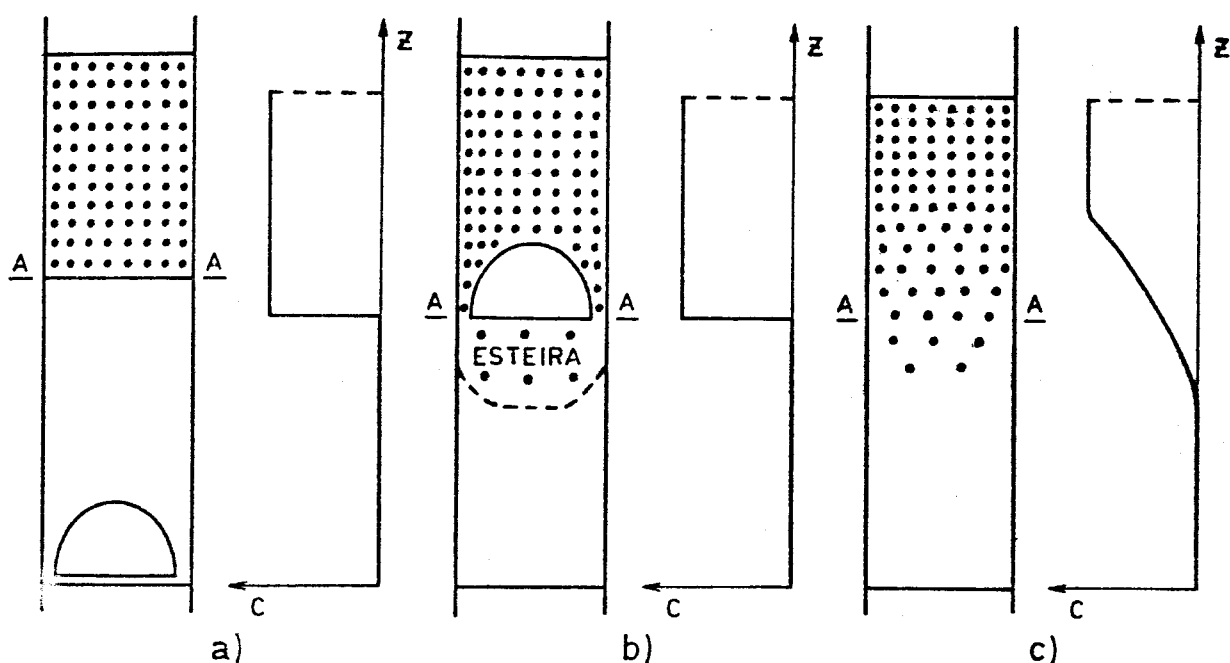


Figura 2.12 - Distribuição de soluto e respectivo perfil de concentração longitudinal devido ao escoamento na região da esteira: a) antes da passagem do "slug" pelo plano AA; b) no instante em que a base do "slug" passa pelo plano AA; c) após passagem do "slug" pelo plano AA.

do mecanismo A, poderá também a curva $c(z)$ ser vista como curva $F(t)$, correspondente à "resposta" da esteira a uma perturbação em degrau na concentração do líquido que a alimenta.

A curva $c(z)$ ou $F(t)$ que na realidade se obtém após passagem de um "slug", (incluindo zona frontal, lateral e esteira) corresponde à conjugação em série, das duas curvas $c(z)$ (ou $F(t)$) correspondentes aos mecanismos A e B acima considerados.

C - Mistura devida à injeção dos "slugs"

A análise dos mecanismos A e B seria suficiente para interpretar a mistura devida à passagem de "slugs" em líquidos, se não se desse o facto

de na injeção de cada "slug", os avanços de líquido na coluna se darem em extensões diferentes, conforme a coordenada radial respectiva. Voltando aos diagramas já usados pode visualizar-se (Figura 2.13) a mistura provocada pela injeção. Isto significa que o simples processo de injeção acarreta já um grau de mistura longitudinal, que tem que ser contabilizado.

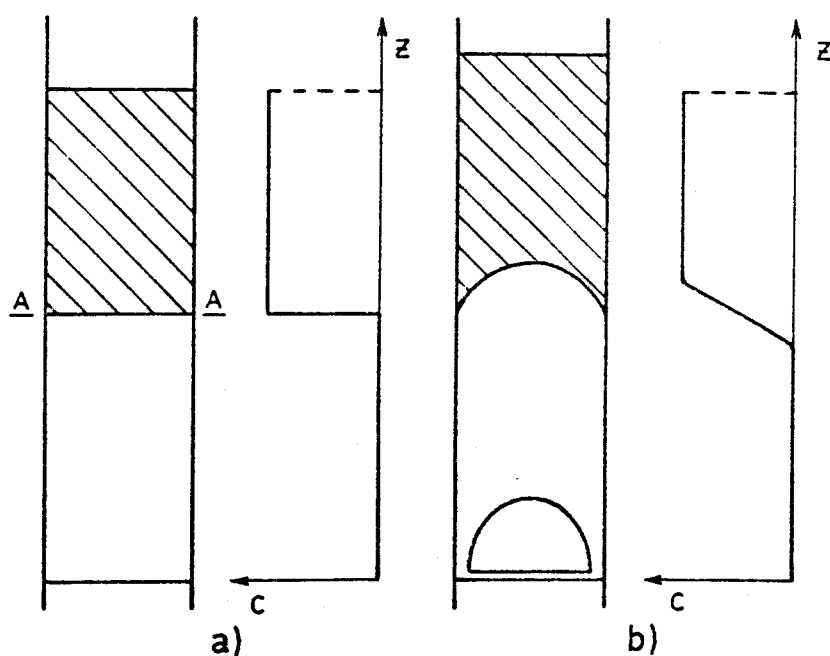


Figura 2.13 - a) Distribuição de soluto e respectivo perfil de concentração longitudinal antes da injeção do "slug";
b) Distribuição de soluto e respectivo perfil de concentração longitudinal após a injeção do "slug".

O problema que nos vai ocupar em grande parte é a explicação (contabilização) da mistura longitudinal observada numa coluna de líquido após a injeção de um número, N , de "slugs". Para isso serão apresentados estudos detalhados que visam quantificar o grau de mistura induzido por cada um dos mecanismos A, B e C aqui considerados.

Convém desde já referir, que este estudo foi feito com "slugs" de tamanho ΔH até 150 mm e em colunas de diâmetro interno respectivamente 19 e 32 mm.

CAPÍTULO 3

Mistura provocada pelo escoamento de um líquido em torno de um "slug"

3.1 Introdução

Neste capítulo estuda-se o escoamento de um líquido em torno de um "slug" que sobe numa coluna cilíndrica vertical e a mistura resultante desse escoamento. É um estudo essencialmente teórico, no qual é testada a influência de vários parâmetros, nomeadamente do diâmetro da coluna (D) e da viscosidade cinemática do líquido (ν).

Relativamente a um observador que se move com o "slug", todo o fluido que se encontra à sua frente, mas suficientemente afastado, está em escoamento com uma velocidade uniforme ($-U_s$). Imagine-se o fluido contido numa secção recta ($z = H_1$, $t = t_0$) - ver Figura 3.1.

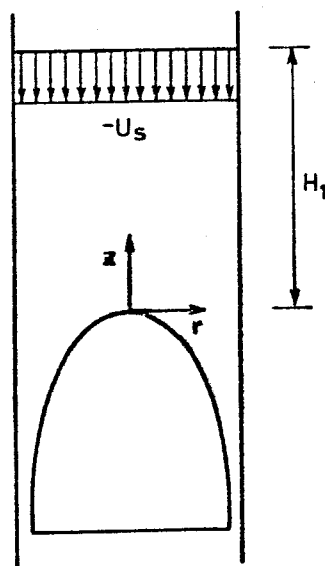


Figura 3.1 - Perfil de velocidade, relativamente ao "slug", numa secção recta de fluido, $z = H_1$, situada para $t = t_0$ longe da zona frontal do "slug".

Este fluído vai-se aproximando do observador com uma velocidade inicialmente uniforme, até que as componentes axial e radial da velocidade dos vários elementos são alteradas pela presença do "slug". Como resultado, a superfície inicialmente plana formada pelos elementos de fluído referidos, estará distorcida ao atingir a base do "slug".

É difícil uma análise do campo de velocidades responsável por esta distorção, tanto mais que a forma exacta da superfície do "slug" é determinada pela solução das equações de escoamento (é o que se chama um problema de escoamento com superfície livre). Para simplificar, o campo de velocidades em torno do "slug" vai ser dividido em duas zonas (ver Figura 3.2):

i) A zona A onde a distribuição de velocidades é modificada essencialmente pelo campo de pressão criado pelo "slug" e pouco afectada pela acção da tensão de corte na parede do tubo.

ii) A zona B onde se faz sentir sobretudo a influência das forças de viscosidade, devido à camada limite que se forma junto da parede. O escoamento nesta zona tem as características de uma película de líquido em queda livre ao longo da parede de um tubo cilíndrico (coluna de parede molhada).

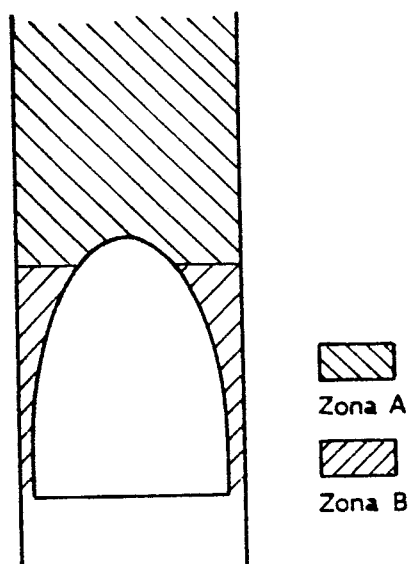


Figura 3.2 - Representação esquemática das zonas frontal e lateral do "slug".

3.2 Forma do "slug" e escoamento do líquido na zona frontal (zona A)

3.2.1 Forma do "slug"

Um "slug" é uma bolha de ar, logo o campo de pressão no seu interior é uniforme. Tomando este facto como ponto de partida e recorrendo à teoria de escoamento potencial (as forças de inércia são mais importantes que as de viscosidade na zona frontal), Dumitrescu (1943), Davies e Taylor (1950), prevêm com um razoável grau de aproximação o raio de curvatura (R_{cu}) da superfície frontal do "slug", bem como a sua velocidade (U_s).

Layzer (1955) inicialmente e depois Collins (1965, 1966, 1967), deram suporte teórico a este estudo.

Collins (1967) demonstrou que a velocidade de um "slug", que sobe num tubo vertical cilíndrico, é função da sua forma no ponto de estagnação

($r = 0, z = 0$):

$$U_s = (g R_{cu})^{1/2} / (df(\theta)/d\theta)_{\theta=0} \quad (3.1)$$

em que R_{cu} é o raio de curvatura da superfície do "slug" no ponto de estagnação, θ é o ângulo medido a partir deste ponto como mostra a Figura 3.3 e $f(\theta)$ é uma função que depende da forma da superfície frontal do "slug" - ver Collins (1966).

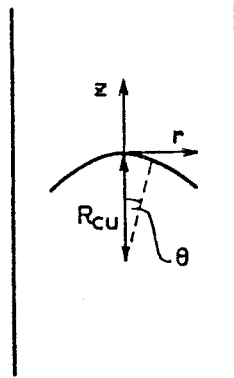


Figura 3.3 - Raio de curvatura da zona frontal do "slug".

No sistema de coordenadas adoptado (preso ao "slug" e com origem no ponto de estagnação) Collins (1967) refere que:

$$\left. \frac{df(\theta)}{d\theta} \right|_{\theta=0} = \frac{R_{cu}}{U_s} \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)_{r=0} \quad (3.2)$$

em que v_r é a componente radial da velocidade de um elemento de fluido sobre a interface.

Com o intuito de determinar o raio de curvatura, Collins (1967) admitiu escoamento irrotacional em torno da zona frontal do "slug" idêntico

ao escoamento potencial em torno de um dipolo centrado no eixo do tubo.

As linhas de corrente do líquido ($\psi = \text{constante}$ em que $v_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}$ e $v_z = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}$) em torno da zona frontal do "slug" são, segundo Collins (1967), bem aproximadas pela seguinte relação:

$$\psi' = \frac{\psi}{U_s R^2} = \frac{r'^2}{2} - \frac{\sum_{n=1}^{\infty} r' J_1(K_n r') \exp[-K_n(z'+c/R)] / J_0^2(K_n)}{\sum_{n=1}^{\infty} K_n \exp(-K_n \frac{c}{R}) / J_0^2(K_n)} \quad (3.3)$$

em que:

r' ($=r/R$) - a coordenada radial normalizada

z' ($=z/R$) - a coordenada axial normalizada

c - a intensidade do dipolo

$J_0(x)$ - a função de Bessel de 1.^a espécie e de ordem 0 da variável x

$J_1(x)$ - a função de Bessel de 1.^a espécie e 1.^a ordem da variável x .

K_n - o zero de ordem n da função de Bessel de 1.^a espécie e 1.^a ordem ($J_1(K_n) = 0$).

Fazendo $\psi' = 0$ na equação anterior, obtém-se, não só a equação da linha de corrente correspondente à superfície livre do "slug", como também, após manipulação matemática, o respectivo raio de curvatura na origem ($r' = 0$, $z' = 0$) em função da intensidade do dipolo (c):

$$\frac{R_{cu}}{c} = \frac{4 R}{c} \frac{\sum_{n=1}^{\infty} K_n^2 \exp(-K_n c/R) / J_0^2(K_n)}{\sum_{n=1}^{\infty} K_n^3 \exp(-K_n c/R) / J_0^2(K_n)} \quad (3.4)$$

Partindo das equações (3.1), (3.2) e (3.3) com $\psi' = 0$ e sabendo que por definição de linha de corrente:

$$v_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (3.5)$$

e

$$v_z = - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (3.6)$$

obtêm-se a equação (3.7), a qual permite calcular a velocidade do "slug" (U_s):

$$U_s = 2 (g R_{cu})^{1/2} \left(\frac{R}{R_{cu}} \right) \frac{\sum_{n=1}^{\infty} K_n \exp(-K_n c/R) / J_0^2(K_n)}{\sum_{n=1}^{\infty} K_n^2 \exp(-K_n c/R) / J_0^2(K_n)} \quad (3.7)$$

Devido ao raio de curvatura se apresentar como função da intensidade do dipolo, $R_{cu} = f(c/R)$, não é possível a determinação da forma do "slug" na zona frontal sem a utilização de um critério adicional. Collins encontrou-o no trabalho de Dumitrescu (1943).

Sendo a interface gás-líquido uma superfície de pressão constante e tomando o líquido como fluido ideal (i.e não viscoso), Dumitrescu (1943)

aplicou a equação de Bernoulli a esta superfície, obtendo:

$$-v_z = \sqrt{2g(-z)} \quad (3.8)$$

em que v_z é a velocidade de um elemento de fluido na interface à cota $z < 0$ relativamente a um observador que se move com o "slug" (velocidade U_s). Du

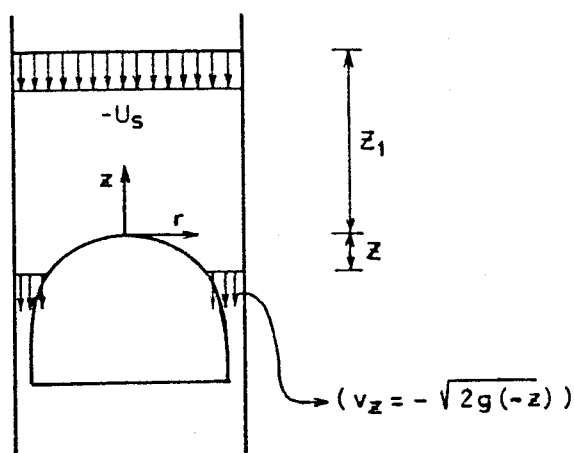


Figura 3.4 - Perfis de velocidade, segundo Dumitrescu, nos planos de cota $z_1 > 0$ e $z < 0$.

mitrescu tomou v_z como a velocidade vertical média de todo o fluido à cota z . Assim, aplicando um balanço material entre as superfícies planas de cotas $z_1 > 0$ e $z < 0$ ($\pi(R^2 - r^2) \sqrt{2g(-z)} = U_s \pi R^2$) - ver Figura 3.4 - obteve:

$$z/R = \frac{-\lambda^2}{[1 - (r/R)^2]^2} \quad (3.9)$$

com

$$\lambda = \frac{U_s}{\sqrt{g D}} \quad (3.10)$$

Esta relação, embora dê uma má aproximação para a forma do "slug" junto ao ponto de estagnação (como exemplo, para $r' = 0$, $z' = -\lambda^2$), fornece valores razoáveis à medida que $-z$ cresce.

Tomando a equação (3.9) como uma assíntota à interface, Collins (1967) determinou o raio de curvatura na origem, de tal forma que a solução da equação (3.3) com $\psi' = 0$ encontra esta assíntota suavemente (i.e, determinou R_{cu} de forma que as duas curvas sejam tangentes num ponto).

Na Figura 3.5 estão representadas a equação (3.3) com $\psi' = 0$ (para um valor de $R_{cu}/R = 0,759$) e a assíntota de Dumitrescu. As duas linhas intersectam-se num ponto de coordenadas ($r' = 0,58$, $z' = -0,28$), sendo tangentes no ponto ($r' = 0,7357$, $z' = -0,5763$). Na Tabela 3.1 são apresentados, com um elevado número de algarismos significativos, as coordenadas das duas curvas na zona do ponto de tangência. Referente à mesma zona está representada na Figura 3.6 a variação com a coordenada r' da derivada dz'/dr' , quer para a equação (3.3) com $\psi' = 0$, quer para a assíntota de Dumitrescu. A igualdade das derivadas para ($r' = 0,7357$, $z' = -0,5763$), confirma a natureza deste ponto.

É de salientar que estes valores se afastam ligeiramente dos calculados por Collins: ($r' = 0,71$, $z' = -0,5$) com $R_{cu}/R = 0,75$. Por qualquer motivo (talvez por falta de rigor no processo de cálculo utilizado), Collins (1967) apresenta como solução um ponto de intersecção em vez de um de tan

Tabela 3.1 - Coordenadas da superfície do "slug" na zona de tangência:

a) equação (3.3) com $\psi' = 0$; b) assíntota de Dumitrescu -
equação (3.9)

r'	$-z'$ (a)	$-z'$ (b)
0,735685	0,57623350	0,57623346
0,735690	0,57625197	0,57625194
0,735695	0,57627045	0,57637042
0,735700	0,57628892	0,57628891
0,735705	0,57630740	0,57630740
0,735710	0,57632588	0,57632588
0,735715	0,57634436	0,57634436
0,735720	0,57636285	0,57636285
0,735725	0,57638135	0,57638134
0,735730	0,57639985	0,57639983
0,735735	0,57641836	0,57641832

gência.

Neste tipo de solução (escoamento potencial em torno de um dipolo), para $R_{cu}/R = 0,759$, há três factos que merecem referência:

i) A velocidade do fluído sobre a interface calculada através das equações (3.3), (3.5) e (3.6), não apresenta desvios superiores a 8% relativamente à obtida com base na equação de Bernoulli, que corresponde aos valores correctos.

ii) O valor $\lambda = \frac{U_s}{\sqrt{g D}} = 0,348$, obtido combinando as equações (3.7) e (3.10), é muito próximo do usualmente utilizado (determinado experimentalmente) no cálculo da velocidade do "slug" em líquidos de baixa viscosidade ($\lambda = 0,35$).

iii) A hipótese de escoamento potencial é uma boa aproximação desde que as forças viscosas não alterem a forma do "slug" na zona do ponto de estagnação. Isto verifica-se deste que a velocidade do "slug" seja $U_s = 0,35 \sqrt{g D}$, o que acontece, segundo White e Beardmore (1966), desde que $\frac{g D^3}{\nu^2} > 10^4$.

3.2.2 Distorção sofrida pelos elementos de fluído situados inicialmente num plano de cota $z = H_1$, na zona de validade do escoamento potencial

A solução estudada (equação (3.3) com $R_{cu}/R = 0,759$) permite o cálculo das velocidades pontuais através das equações (3.5) e (3.6), com boa

aproximação, para o escoamento em torno do "slug" na região $z' > -0,7$ (este limite resulta da necessidade de convergência "rápida" das séries na equação (3.3)).

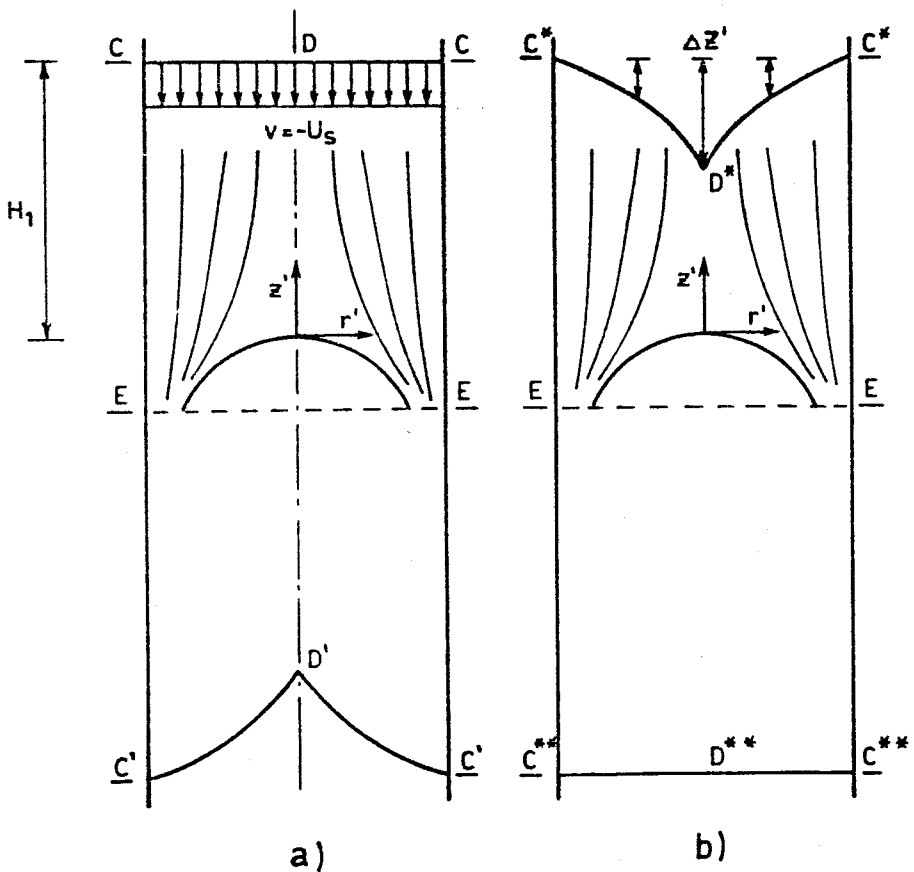


Figura 3.7 - Representação esquemática das curvas de distorção (a) e de proveniência (b) para a zona frontal do "slug".

O cálculo do tempo que cada elemento de fluido, inicialmente no plano $z' = H_1$ (suficientemente afastado do "slug" - ver Figura 3.7), demora a atingir o plano $z' = -0,7$, pode ser feito recorrendo às equações (3.5) e (3.6), que podem ser reescritas de forma adimensional:

$$\frac{\partial r'}{\partial \tau} = \frac{v_r}{U_s} = \frac{1}{r'} \frac{\partial \psi'}{\partial z'} \quad (3.11)$$

e

$$\frac{\partial z'}{\partial \tau} = \frac{v_z}{U_s} = - \frac{1}{r'} \frac{\partial \psi'}{\partial r'} \quad (3.12)$$

em que

$$\tau = \frac{t \cdot U_s}{R}$$

Conhecendo o tempo que os elementos sobre diferentes linhas de corrente demoram a ir de $z = H_1$ até ao plano EE e supondo que após a passagem no plano EE, a velocidade axial era a mesma ($-U_s$) para todos os elementos de fluído, ou seja desprezando a distorção longitudinal que se observa após o plano EE, pode representar-se a linha $C' D' C'$ (Figura 3.7a), que traduz a distorção da linha CDC (i.e plano de cota $z = H_1$ em corte) efectuada na zona A.

Em alternativa (ver Figura 3.7b), pode-se medir a distorção observada numa dada região (A neste caso), considerando a linha $C^* D^* C^*$ de proveniência dos elementos de fluído, que passam simultaneamente na secção recta à saída dessa região (plano EE).

Para o traçado desta linha, começa-se por resolver numericamente o sistema composto pelas equações (3.11) e (3.12) - com ψ' dado pela equação (3.3) - de forma a determinar o tempo que ao longo de cada linha de corrente é necessário para ir de C D C a EE. O atraso Δt que cada elemento apresenta em relação ao mais rápido, permite calcular o avanço $\Delta z = U_s \Delta t$ com

que cada elemento terá que partir para que todos passem simultaneamente em EE.

É fácil mostrar que, as linhas de deformação e de proveniência são simétricas em relação à secção recta da coluna.

Na Figura 3.8 está representada a linha de proveniência correspondente à distorção na zona A; neste gráfico X' ($=X/R$) representa a proveniência do elemento mais lento (elemento situado junto ao eixo da coluna). O valor de X' poderá ser qualquer superior a 3, de forma a garantir que todos os elementos da curva possuam, para $t = t_0$, igual velocidade relativamente ao "slug", $-U_s$. Por outras palavras, para $X' \geq 3$ a presença do "slug" ainda não alterou de forma perceptível a velocidade dos elementos que vão passar simultaneamente no plano EE. É de salientar, o facto desta curva ser independente do diâmetro da coluna.

O conhecimento dos tempos que os elementos situados à cota $z = H_1$, para $t = t_0$, demoram a atingir o plano de cota $z' = -0,7$, ao longo de uma linha de corrente, permite traçar para a região A a curva F de Danckwerts (1953), já descrita no Capítulo 2.

Para ilustrar o seu cálculo, imagine-se um observador colocado, no instante $t = t_0$, no plano $z = H_1$ numa posição radial r_1 (ponto pertencente à linha de corrente $\psi' = a$). Imagine-se ainda que, nesse instante, todo o líquido acima do observador ($z > H_1$) tinha concentração $c = c_0$, enquanto que o situado a cotas inferiores ($z < H_1$) tinha concentração $c = 0$.

Seja $t = t_1$ o instante em que o observador, seguindo a linha de corrente $\psi' = a$ à velocidade dada pelas equações (3.5) e (3.6), atinge o pla-

no de cota $z' = -0,7$. Se o observador pudesse medir a concentração dos elementos de fluído que com ele passam no plano $z' = -0,7$, concluiria que entre a sua linha de corrente ($\psi' = a$) e a parede da coluna ($\psi'_p = 0,5$), $c = c_o$, enquanto que entre $\psi' = a$ e a superfície do "slug" ($\psi'_s = 0$), $c = 0$.

Este conhecimento permite calcular a fracção do caudal de fluído com concentração $c = c_o$, que no instante $t = t_1$, passa no plano $z' = -0,7$. Assim, e atendendo à definição de linha de corrente ($\partial Q = 2 \pi \partial \psi$):

$$\frac{Q_{c_o}}{Q_T} = \frac{\psi'_p (=0,5) - \psi' (=a)}{\psi'_p (=0,5) - \psi'_s (=0)} \quad (3.13)$$

em que Q_T representa o caudal total ($Q_T = U_s \pi D^2/4$), ou

$$\frac{Q_{c_o}}{Q_T} = 1 - 2a \quad (3.14)$$

Conhecida esta fracção, é possível saber a concentração média do fluído que passa no instante t_1 no plano $z' = -0,7$, já que entre $\psi' = a$ e $\psi'_s = 0$, $c = 0$:

$$c = c_o Q_{c_o}/Q_T$$

ou

$$c/c_o = 1 - 2a \quad (3.15)$$

Alargando esta análise a todas as linhas de corrente (entre $\psi'_s = 0$

e $\psi'_p = 0,5$), constrói-se a curva F de Danckwerts.

A Figura 3.9 representa a curva $F(t)$ correspondente à passagem do fluído na região $z' > -0,7$ (o grau de concentração pode ser feito em qualquer plano desde que $X' (=X/R) \geq 3$), numa coluna de diâmetro interno 19 mm. Nesta figura, T representa o tempo que o elemento mais rápido ($\psi' = 0,5$) demora a atravessar esta região (desde X' até $z' = -0,7$). Note-se que esta representação é justificada pelo facto de que, para analisar a distorção, só interessa o atraso que os diferentes elementos sofrem em relação ao mais rápido.

Da análise da Figura 3.8 conclui-se que os elementos que passam simultaneamente na base da zona A ($z' = -0,7$), provêm todos de uma gama de cotas $\Delta z' = 1,7$ (por exemplo, numa coluna de diâmetro 19 mm, $\Delta z = \Delta z' \times 19/2 = 16,2$ mm); isto corresponde a dizer que a diferença entre os tempos de descida do elemento mais rápido ($\psi' = 0,5$) e do mais lento ($\psi' \approx 0$), desde $X \geq 3 \times 19/2$ mm até $z = -0,7 \times 19/2$ mm, é 0,11 s (numa coluna de diâmetro 19 mm - ver Figura 3.9).

Esta distorção longitudinal sofrida pelo fluído é talvez enganadora por excesso, já que o maior atraso se dá numa zona estreita de elementos situados perto do eixo da coluna. Uma medida que parece mais correcta é a proveniência ou o atraso, relativamente ao elemento mais rápido, de 90% dos elementos.

Analisando novamente as Figuras 3.8 e 3.9 conclui-se que, dos elementos que passam simultaneamente na base da zona A, 90% provêm de uma gama de cotas inferior a $\Delta z' = 0,32$ (numa coluna de diâmetro 19 mm, $\Delta z = 3$ mm); isto equivale a dizer que numa coluna de 19 mm, a diferença entre os tem-

pos de residência de 90% dos elementos e o do elemento mais rápido, é inferior a 0,02 s (1/5 do valor encontrado para todos os elementos).

3.3 Estudo do escoamento na película de líquido entre a parede e o "slug". (Zona B)

3.3.1 Introdução

Para valores de $-z$ suficientemente elevados, a película de líquido entre a parede e o "slug" pode considerar-se em queda livre ao longo da parede (a pressão no interior do "slug" é constante e a tensão de corte na interface gás-líquido é desprezável devido ao baixo valor da viscosidade do ar).

Numerosos estudos foram feitos sobre os principais aspectos deste tipo de escoamento (regime, espessura limite da película de líquido e perfil de velocidade), não sendo unânime a opinião dos vários autores. Importa aqui salientar alguns aspectos deste escoamento.

3.3.2 Tipo de regime

A disparidade entre os valores do número de Reynolds ($Re_{\delta} = \frac{v_m \cdot \delta}{\nu}$, em que v_m representa a velocidade média do líquido na película com espessura δ), propostos para a transição laminar-turbulento pelos diversos autores (Fulford (1964)), deve-se ao facto desta transição ser fortemente influenciada por pequenas perturbações no escoamento (rugosidade do tubo, existência de elementos tensio-activos e inclusivamente possibilidade de es

coamento ondulatório na película do líquido).

Contudo, os diversos estudos (Fulford (1964)) apontam para um limite inferior de Re_δ na gama 250 a 400 e um limite superior à volta de 800.

3.3.3 Perfil de velocidade e espessura limite da película em escoamento laminar

Segundo Brown (1965), o escoamento laminar de um líquido em queda livre ao longo da parede de uma coluna cilíndrica apresenta o seguinte perfil de velocidade relativamente à parede do tubo:

$$-v_z = \frac{g}{\nu} R^2 \left(\frac{1 - r'^2}{4} - \frac{R'_c}{2} \ln 1/r' \right) \quad (3.16)$$

em que

$$R'_c (=R_c/R) \quad \text{e} \quad R_c = R - \delta \quad (\text{ver Figura 3.10a}).$$

Este resultado decorre de um simples balanço entre a força de gravidade e a força de corte.

Uma boa aproximação a este perfil (desde que $2\delta/R \ll 1$), é a solução obtida no escoamento laminar sobre uma placa plana (igualmente o referencial é a parede da placa):

$$-v_z = \frac{g}{\nu} (\delta y - y^2/2) \quad (3.17)$$

em que y é a coordenada perpendicular à placa (ver Figura 3.10b).

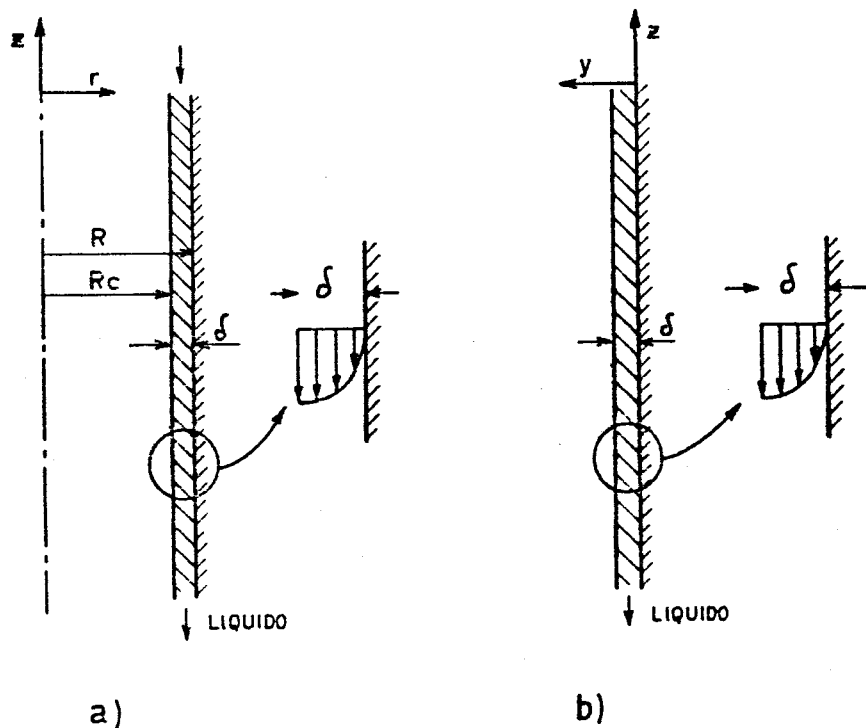


Figura 3.10 - Perfil de velocidade numa coluna de parede molhada:
a) tubo cilíndrico; b) placa plana.

As velocidades médias correspondentes podem ser obtidas por integração, $-v_m = \frac{\int_A v_z dA}{A}$. Para geometria cilíndrica resulta:

$$-v_m = \frac{g R^2}{\nu} \frac{1}{1-R_c^2} \left[\frac{2}{3} \xi^3 (1 - \xi) + \frac{1}{10} \xi^5 + \frac{1}{60} \xi^6 + \dots \right] \quad (3.18)$$

com $\xi = \delta/R$ e para geometria plana:

$$-v_m = \frac{g \delta^2}{3 \nu} \quad (3.19)$$

Quando da subida de um "slug" num tubo, a velocidade média do líquido na película é relacionável com a velocidade do "slug", U_s , através de um balanço material ao líquido, tomando agora um referencial preso ao "slug":

$$U_s \pi R^2 = (U_s + v_m) \pi (R^2 - R_c^2) \quad (3.20)$$

Substituindo as expressões da velocidade média - (3.18) e (3.19) - na equação anterior, obtêm-se relações entre a velocidade do "slug" e a espessura limite da película de líquido.

Para geometria cilíndrica:

$$U_s = \frac{g}{\nu} R^2 \frac{1}{(1-\xi)^2} \left[\frac{2}{3} \xi^3 (1-\xi) + \frac{1}{10} \xi^5 + \frac{1}{60} \xi^6 + \dots \right] \quad (3.21)$$

e para geometria plana:

$$U_s = \frac{g}{\nu} R^2 \cdot \frac{2}{3} \frac{\xi^3}{(1-2\xi)} \quad (3.22)$$

Note-se que, para $\xi (= \delta/R)$ suficientemente pequeno, ambas as equações se reduzem a:

$$U_s = \frac{g}{\nu} R^2 \cdot \frac{2}{3} \xi^3 \quad (3.23)$$

Na Figura 3.11 está representado $Re_{\delta} (= \frac{v_m \delta}{\nu})$ em função do diâmetro da coluna e na Figura 3.12, $\xi (= \delta/R)$ igualmente em função do diâmetro da coluna, para alguns valores de ν , admitindo escoamento laminar. O cálculo da velocidade do "slug" foi feito recorrendo à expressão $U_s = \lambda \sqrt{g D}$, com os valores de λ do trabalho de White e Beardmore (1966).

As conclusões mais relevantes que estes gráficos fornecem são, nomeadamente:

i) Em colunas com água ($\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), desde que o diâmetro seja superior a 22 mm, o regime passa de laminar a turbulento (admitindo Re_{δ} de transição igual a 800).

Para líquidos com $\nu = 5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, só para colunas com diâmetro muito superior a 40 mm é que se atinge este valor de transição.

ii) Numa coluna de diâmetro D , a espessura da película, δ , aumenta para valores crescentes de ν .

iii) Os valores da espessura limite obtidos nesta análise de escoamento laminar estão de acordo dentro de uma gama de 6%, com as experiências de Nicklin et al (1962) para "slugs" de ar em água em colunas de 26 mm de diâmetro. As experiências relatadas no Capítulo 5 dão também uma confirmação dos valores da espessura limite calculados.

3.3.4 Perfil de velocidade e espessura limite da película em escoamento turbulento

Brotz (1954) propôs uma relação empírica para a espessura de uma película em regime turbulento com base em estudos experimentais com "slugs" de ar em água, em tubos de diferentes diâmetros:

$$\delta(g/\nu^2)^{1/3} = \left(\frac{3 \operatorname{Re}_\delta^2}{590}\right)^{1/3} \quad (3.24)$$

Esta relação, embora empírica, está de acordo como é focado por Fernandes et al (1983), com os resultados de uma análise teórica apresentados numa forma gráfica por Dukler (1959).

Combinando as equações (3.20) e (3.24), conclui-se que $\xi (= \delta/R)$ em regime turbulento é independente do diâmetro da coluna ($\xi = 0,0485$).

O perfil de velocidade, devido à própria estrutura do escoamento, apresenta-se de difícil análise, quer teórica, quer experimental. Segundo a literatura - Fulford (1964) - a expressão que melhor traduz a realidade é a apresentada por Dukler et al (1952) - baseada no comprimento de mistura em escoamento turbulento:

$$\begin{aligned} v_z^+ &= z^+ & 0 \leq z^+ \leq 5 & \quad (\text{sub-camada laminar}) \\ v_z^+ &= -3.05 + 5.0 \ln z^+ & 5 < z^+ \leq 30 & \quad (\text{camada intermediária}) \\ v_z^+ &= 5.5 + 2.5 \ln z^+ & 30 < z^+ \leq \delta^+ & \quad (\text{zona turbulenta}) \end{aligned} \quad (3.25)$$

em que:

$$v_z^+ = v_z / v_z^*$$

$$z^+ = \rho z v_z^* / \mu$$

$$\delta^+ = \rho \delta v_z^* / \mu$$

$$v_z^* = (\tau_w / \rho)^{1/2}$$

com τ_w a tensão de corte na parede.

3.3.5 Distorção devida ao escoamento ao longo de uma coluna de parede molhada. Aproximação para a região lateral do "slug" considerando escoamento laminar

Na zona designada por B na introdução deste capítulo ($z/R < -0,7$ - ver Figura 3.2), a espessura da película de líquido vai diminuindo para valores crescentes de $-z$, até que atinge o seu valor limite. Designe-se por B_2 a zona em que a película já atingiu a sua espessura limite e por B_1 a zona entre A e B_2 - ver Figura 3.13.

No intuito de quantificar a distorção sofrida pelos elementos de fluido após a passagem na zona designada por A, vai-se considerar que a zona B_2 é contígua a A, o que equivale a medir a distorção em B_1 como se de B_2 se tratasse. A estimativa assim obtida será certamente por excesso, já que as taxas de corte aumentam de A para B_2 . Antes porém é instrutivo fazer uma estimativa da extensão da zona B_1 .

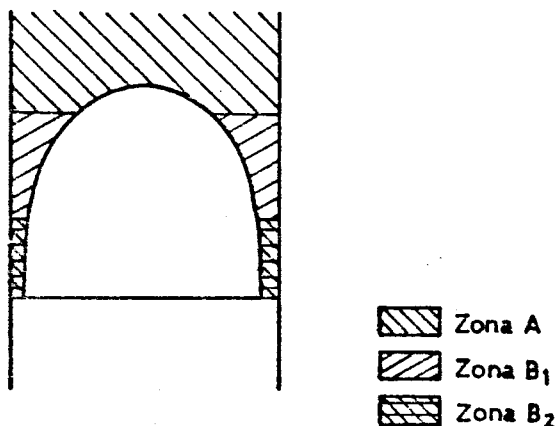


Figura 3.13 - Sub-divisão da zona lateral do "slug": zona de espessura limite (B_2), zona intermêdia (B_1).

Para o seu cálculo, admite-se que as forças viscosas não alteram a velocidade do líquido na interface gás-líquido nas zonas A e B_1 , o que permite calcular a coordenada z do ponto onde a velocidade dada pela equação de Bernoulli (3.8), iguala a velocidade máxima na película laminar correspondente ao caudal de líquido deslocado pelo "slug" em ascensão, isto é, o valor de z que satisfaz o seguinte sistema de equações:

$$-v_z = \frac{g}{v} R^2 \left(\frac{1 - R'^2_c}{4} - \frac{R'^2_c}{2} \ln 1/R'_c \right) \quad (3.26)$$

$$-v_z = \sqrt{2g(-z)} - U_s$$

em que a primeira equação resulta de se fazer $r' = R'_c$ (coordenada radial da interface) na equação (3.16).

É de notar que se está a considerar, independentemente do valor de Re_δ , regime laminar; isto deve-se ao facto dos perfis de velocidade em regime turbulento serem difíceis de manipular. Contudo, como a seguir se verá, as estimativas assim conseguidas são sempre por excesso.

Estimativas dos valores de z para os quais a camada atinge a sua espessura limite estão representadas, respectivamente, na Figura 3.14 em função da viscosidade cinemática do líquido para uma coluna de 19 mm de diâmetro e na Figura 3.15 em função do diâmetro da coluna para a água ($\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). Na Figura 3.15 estão igualmente representadas estimativas considerando o escoamento turbulento. Para o seu traçado, admitiu-se que o valor da velocidade sobre a interface gás-líquido era igual a toda a velocidade média na película - equação (3.20) com δ dado pela equação (3.24).

Estas figuras mostram que:

i) Admitindo escoamento laminar, quanto mais elevada for a viscosidade cinemática do líquido, ν , menor é o valor absoluto da cota z para a qual a película atinge a sua espessura limite. Enquanto que numa coluna de 19 mm de diâmetro, a película de água atinge a sua espessura limite num ponto de cota $-z = 170 \text{ mm}$, uma película de um líquido com $\nu = 20 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ atinge-a para $-z = 25 \text{ mm}$.

ii) Independentemente do tipo de regime, para um dado líquido, quanto maior for o diâmetro da coluna mais elevado é o valor absoluto da cota à qual a espessura da película estabiliza. Enquanto que numa coluna de 19 mm a película de água estabiliza num ponto de cota $-z = 170 \text{ mm}$, numa de 32 mm estabiliza para $-z = 470 \text{ mm}$ (admitindo escoamento laminar).

iii) Como se pode ver na Figura 3.15, a película estabiliza para valores absolutos de z superiores no caso de o escoamento ser considerado laminar. Isto permite pensar, independentemente de Re_δ , nos valores obtidos em escoamento laminar como se de um limite superior se tratasse. É curioso assinalar que para $D \approx 14$ mm ($Re_\delta = 500$) o valor de z é igual, quer seja calculado admitindo escoamento laminar, quer turbulento.

Como conclusão, pode-se dizer que, quanto maior for a viscosidade do líquido e menor for o diâmetro da coluna, mais realista é a hipótese adotada de que a região B_1 é desprezável.

Tendo presente esta conclusão, considere-se que as regiões B_1 e B_2 - zona lateral do "slug" - podem ser representadas aproximadamente por um cilindro de altura H_{eq} . Na Figura 3.16 está representado o perfil de velocidade, ampliado, nesta zona, tomando como referencial o "slug".

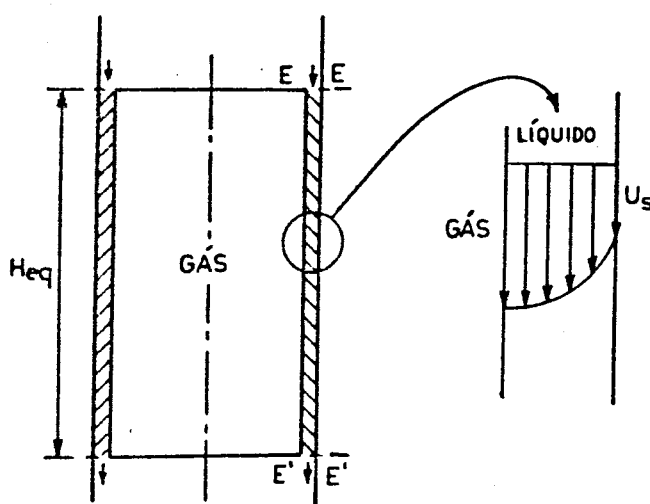


Figura 3.16 - Perfil de velocidade, ampliado, na zona lateral tomando como referencial o "slug".

Supondo uma linha (plano em corte) horizontal EE, pretende-se saber como ela é distorcida até sair em E'E'. Para isso calcularam-se os tempos t_i (para cada ψ_i), dados por $t_i = H_{eq}/(v_i + U_s)$, em que os valores de v_i são conhecidos da análise de escoamento laminar atrás apresentada. Tomando como referência o tempo t_{is} do elemento mais rápido (na superfície do "slug" - interface gás-líquido), calcularam-se os atrasos temporais, $\Delta t_i = t_i - t_{is}$, para os restantes elementos, sendo $\Delta z_i = U_s \Delta t_i$ (tal como já foi referido) o atraso em distância de cada elemento na zona lateral, supondo que fora da zona em estudo não há distorção na longitudinal. O conhecimento de Δz_i permite traçar, quer a curva de proveniência, quer a de distorção para a zona lateral (de escoamento "pelicular"), uma vez que elas são simétricas em relação à horizontal.

Mais uma vez o escoamento é considerado laminar, independentemente do valor de Re_δ . Isto deve-se ao facto de, para além do carácter de um escoamento turbulento (o qual tende a eliminar perfis radiais de concentração), a distorção em regime laminar se apresentar mais acentuada (devido ao tipo de perfil de velocidade), podendo servir como limite superior de análise.

3.3.5.1 Efeito da viscosidade do líquido

Na Figura 3.17 é possível fazer a comparação entre as curvas de proveniência (I, III), obtidas na mesma coluna ($D = 19$ mm), mas com líquidos de viscosidade diferente - a curva I para $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, a III para $\nu = 50 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Tal como na análise da zona frontal, $X'' (= \frac{X}{H_{eq}})$ representa a cota de proveniência do elemento mais lento; note-se que ambas as cur

vas passam no ponto $(0,5, X'')$.

As curvas $F(t/H_{eq})$, correspondentes a esta região, são calculadas de forma análoga à delineada na secção 3.2.2, só que agora entra-se com a velocidade, para os vários elementos, dada pela equação (3.16). Na Figura 3.18 estão representadas as curvas $F(t/H_{eq})$ obtidas para as duas situações acima referidas - curvas I, III. Tal como na análise da zona frontal, T representa o tempo que o elemento mais rápido, $\psi' = 0$, demora a atravessar esta região.

Da análise destas figuras observa-se que, no caso do líquido menos viscoso, é maior a gama de cotas (Δz) de proveniência dos elementos que vão passar simultaneamente na base do "slug":

$$\text{- Se } \nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{então} \quad \Delta z/H_{eq})_{100\%} = 0,915$$

$$\text{- Se } \nu = 50 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{então} \quad \Delta z/H_{eq})_{100\%} = 0,715$$

Em correspondência, na curva $F(t/H_{eq})$ observa-se, para o líquido menos viscoso, uma maior diferença entre o tempo de residência do elemento mais rápido (sobre $\psi' = 0$) e o do mais lento (sobre $\psi' = 0,5$):

$$\text{- Se } \nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{então} \quad \Delta t/H_{eq})_{100\%} = 6,2 \times 10^{-3} \text{ s/mm}$$

$$\text{- Se } \nu = 50 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{então} \quad \Delta t/H_{eq})_{100\%} = 4,7 \times 10^{-3} \text{ s/mm}$$

Contudo, como já aconteceu na análise da distorção na zona frontal, os elementos que sofrem o maior atraso situam-se numa faixa estreita de co

luna, agora perto da parede. Igualmente aqui, a medida do atraso sofrido por 90% dos elementos é recomendável. Curiosamente, segundo este critério, conclui-se que no caso do líquido menos viscoso, 90% dos elementos provêm de uma gama de cotas bastante mais estreita do que no caso do líquido mais viscoso:

$$- \text{ Se } \nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{então } \Delta z/H_{eq})_{90\%} = 0,160$$

$$- \text{ Se } \nu = 50 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{então } \Delta z/H_{eq})_{90\%} = 0,406$$

Na curva $F(t/H_{eq})$ a mesma análise conduz aos seguintes valores:

$$- \text{ Se } \nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{então } \Delta t/H_{eq})_{90\%} = 1,05 \times 10^{-3} \text{ s/mm}$$

$$- \text{ Se } \nu = 50 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{então } \Delta t/H_{eq})_{90\%} = 2,66 \times 10^{-3} \text{ s/mm}$$

Com a finalidade de se generalizar a influência da viscosidade na distorção observada numa coluna de 19 mm de diâmetro, traçaram-se as Figuras 3.19 e 3.20 nas quais se representou em ordenadas, respectivamente, a proveniência e o atraso (relativamente ao elemento mais rápido), de 90% dos elementos.

Pode-se assim concluir que, na região lateral (zona B), para um dado tamanho de coluna ($D = 19 \text{ mm}$), a maioria dos elementos sofrem uma distorção tanto menor quanto mais baixa for a viscosidade do líquido.

3.3.5.2 Efeito do diâmetro da coluna

Na Figura 3.17 pode-se igualmente estudar o efeito do diâmetro da coluna na curva de proveniência. Para isso, basta comparar as curvas obtidas para a água, respectivamente, em colunas com diâmetro 19 mm (I) e 32 mm (II). Na Figura 3.18 pode fazer-se este estudo, agora para a curva $F(t/H_{eq})$. Tanto as curvas de proveniência como as curvas $F(t/H_{eq})$ mostram-se bastante semelhantes, se bem que se note uma distorção ligeiramente maior nas curvas obtidas na coluna de menor diâmetro:

$$- \text{ Se } D = 19 \text{ mm} \quad \text{então} \quad \Delta t/H_{eq})_{90\%} = 1,05 \times 10^{-3} \text{ s/mm}$$

$$- \text{ Se } D = 32 \text{ mm} \quad \text{então} \quad \Delta t/H_{eq})_{90\%} = 6,30 \times 10^{-4} \text{ s/mm}$$

Tal como para o estudo do efeito da viscosidade, traçaram-se as Figuras 3.21 e 3.22 de forma a generalizar a influência do diâmetro da coluna. Da sua análise conclui-se que, na zona lateral, quanto menor for o diâmetro da coluna maior é a distorção sofrida por 90% dos elementos do fluido.

3.3.5.3 Efeito do comprimento do cilindro (H_{eq})

Nas Figuras 3.23 e 3.24 estão representadas as curvas de proveniência e as curvas $F(t)$ para a água ($\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), obtidas numa coluna de 19 mm de diâmetro, para três valores de H_{eq} (50, 100 e 150 mm).

Embora a variação introduzida por este parâmetro seja conhecida (proporcional a H_{eq} , já que a velocidade em cada linha de corrente é cons-

tante), estas figuras têm como fim chamar a atenção para o rápido acentuar da distorção com um aumento de H_{eq} .

3.4 Distorção sofrida pelos elementos de fluído, situados inicialmente num plano de cota $z = H_1$, devida ao escoamento em torno do "slug"

Devido ao escoamento de um elemento de fluído, na zona frontal e na zona lateral, poder ser estudado ao longo de uma linha de corrente (pe lo menos para tubos de diâmetro não muito grande), a distorção de uma linha processa-se de maneira contínua, podendo ser calculada como a "soma" das distorções ocorridas em zonas consecutivas.

Dentro da aproximação já mencionada, de considerar duas zonas idealizadas, A e B, consecutivas para representar o escoamento em torno do "slug", a distorção até à entrada na esteira pode ser calculada pela soma das distorções nas zonas A e B.

Nas Figuras 3.25 e 3.26 estão representadas as curvas de proveniências e as curvas $F(t)$ (zonas A + B), obtidas para a água, numa coluna de 19 mm de diâmetro, para três tamanhos de "slug" ($L_s = 50, 100$ e 150 mm, com $L_s = H_{eq} + 0,7 \times 19/2$ mm). Na Figura 3.25, tal como anteriormente, $X' (=X/R)$ representa a cota de proveniência do elemento mais lento, enquanto que na Figura 3.26, T representa o tempo que o elemento mais rápido ($0,1 \leq \psi' \leq 0,2$ conforme H_{eq}) demora a atingir a base do "slug".

Refira-se que, como seria previsível, a importância de cada zona na distorção total depende tanto do diâmetro da coluna como do comprimento do "slug".

Com o intuito de generalizar o efeito do diâmetro da coluna, estão representadas nas Figuras 3.27 e 3.28, para o caso da água, respectivamente a proveniência e o atraso, relativamente ao elemento mais rápido, de 90% dos elementos, para valores de $L_s = 50, 100$ e 150 mm.

De forma a dar, neste ponto da tese, uma noção sobre a importância da mistura provocada pelo escoamento em torno do "slug" na mistura total, traçou-se igualmente na Figura 3.28 a curva representativa do tempo que um "slug" demora a percorrer um comprimento igual a um diâmetro de coluna, t_D . A relação entre estas curvas será convenientemente explicada no Capítulo 4, bastando para já referir que, quanto maior for $t_D/\Delta t)_{90\%}$, menos importante se torna a mistura provocada pelo escoamento. Sendo assim, a Figura 3.28 sugere que a importância da esteira na mistura total (objectivo desta tese) é tanto maior quanto maior for o diâmetro da coluna e quanto menor o comprimento do "slug".

3.5 Conclusões

O balanço da importância do escoamento do líquido em torno de um "slug", na mistura longitudinal observada após a passagem do "slug" numa coluna, só poderá ser feito após o estudo dos outros dois mecanismos considerados importantes (esteira e injeção do "slug" - ver Capítulo 2).

Contudo três conclusões podem ser tiradas:

i) Quanto maior for a viscosidade do líquido, tanto maior é a mistura provocada pelo escoamento na zona frontal e lateral do "slug".

ii) Quanto maior for o diâmetro da coluna, tanto menor é a mistura provocada pelo escoamento na zona frontal e lateral do "slug".

iii) Quanto maior for o tamanho do "slug", tanto maior é a mistura provocada pelo escoamento na zona frontal e lateral do "slug".

Além destas conclusões, é importante ter presente que todas as hipóteses formuladas neste capítulo foram no sentido de determinar a máxima mistura que se pode obter numa dada situação, isto é, no sentido de obter estimativas por excesso da mistura. Com este intuito considerou-se sempre escoamento laminar e tomou-se a zona lateral do "slug" como se de um cilindro se tratasse.

CAPÍTULO 4

Mistura longitudinal provocada pela esteira de "slugs" em colunas de água

4.1 Introdução

Considere-se uma coluna vertical de diâmetro interno D , contendo água até uma altura H , sendo o valor da razão H/D , por hipótese, maior que 20.

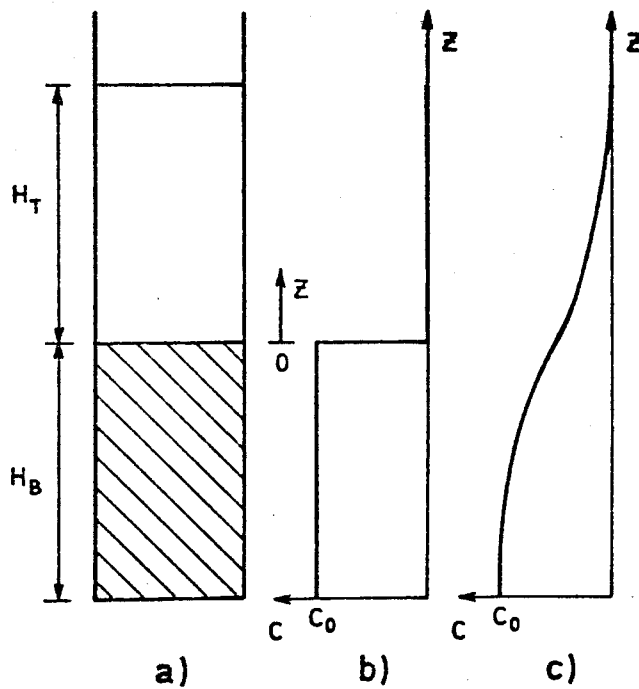


Figura 4.1 - a) Distribuição inicial de soluto na coluna;
 b) Perfil de concentração inicial;
 c) Perfil de concentração após a passagem de N "slugs"

Imagine-se que da base, $z = -H_B$, até uma altura $z = 0$, a água contém um corante à concentração $c = c_0$ (constante) e seja $c = 0$ uniformemente de $z = 0$ até ao topo ($z = H_T$) - ver Figura 4.1a. Existirá então um perfil de concentração em degrau ao longo da coluna, como mostra a Figura 4.1b. Interessa aqui estudar, como é que por passagem de bolhas gasosas grandes

("slugs") introduzidas na base da coluna, vai processar-se a mistura das duas porções de líquido (corado e não corado), traduzida por uma modificação do perfil de concentração (ver Figura 4.1c).

É conveniente repetir (rever Capítulo 2) que não se está a procurar estudar o grau de mistura radial. O valor da concentração a cada cota, representa a concentração que resultaria se o líquido nessa secção recta fosse todo homogeneizado. Efectivamente, em água há uma boa mistura radial induzida pela passagem de cada "slug" como se pode constatar visualmente.

Os mecanismos determinantes da mistura em colunas de água, para os tamanhos dos "slugs" utilizados nas experiências, são fundamentalmente dois:

- i) O deslocamento ascendente da massa de líquido acima do "slug".
- ii) A passagem do líquido na esteira do "slug".

A mistura resultante do escoamento em torno do "slug" (Capítulo 3), vai ser, neste ponto da tese, considerada desprezável em face de (i) e (ii). Uma futura análise (secção 4.5) confirmará, ou não, para as condições experimentais utilizadas, esta hipótese.

A mistura referida por (i), é resultante quer do deslocamento do líquido durante a injeção do "slug", quer do movimento do líquido (também para cima) que acompanha a expansão do "slug", à medida que este sobe num campo de pressões decrescente em direcção à superfície livre.

A mistura referida em (ii) está associada à existência de uma esteira que acompanha o "slug" na sua subida.

4.2 Alguns aspectos teóricos

4.2.1 Introdução à noção de mistura promovida pela esteira de "slugs"

Maxworthy (1966), usando uma técnica muito simples de visualização, parece ter sido o primeiro a evidenciar a existência de esteiras em bolhas.

Filla et al. (1979), num estudo pormenorizado, concluíram do carácter turbulento das esteiras de bolhas gasosas grandes ("slugs") em água.

A simples observação a olho nũ do movimento do líquido imediatamente abaixo do "slug", permite constatar a existência de uma zona de recirculação (agitação) intensa numa curta extensão e a toda a largura da coluna (a observação do movimento do líquido é possível graças à presença de pequenas bolhas de ar que sempre surgem na esteira do "slug").

É a acção desta esteira, que neste trabalho se atribui o principal papel na mistura provocada pela ascensão do "slug" através do líquido. Pelo seu carácter turbulento e pela relativa boa definição da zona de recirculação, o seu efeito é comparado ao de uma zona ("tanque") perfeitamente agitada de volume constante, V_e , que acompanha o "slug" na sua subida, estando o líquido, antes e depois deste "tanque", em repouso. Um esquema deste modelo simplista é apresentado na Figura 4.2b. Alternativamente, visto de um referencial preso ao "slug", a acção da esteira é comparável à de um "tanque" bem agitado (volume V_e), percorrido por água a um caudal $Q = U_s A$, em que U_s é a velocidade do "slug" e A a área da secção recta do tubo, sendo o escoamento pistão (velocidade $-U_s$) a montante e jusante do "tanque".

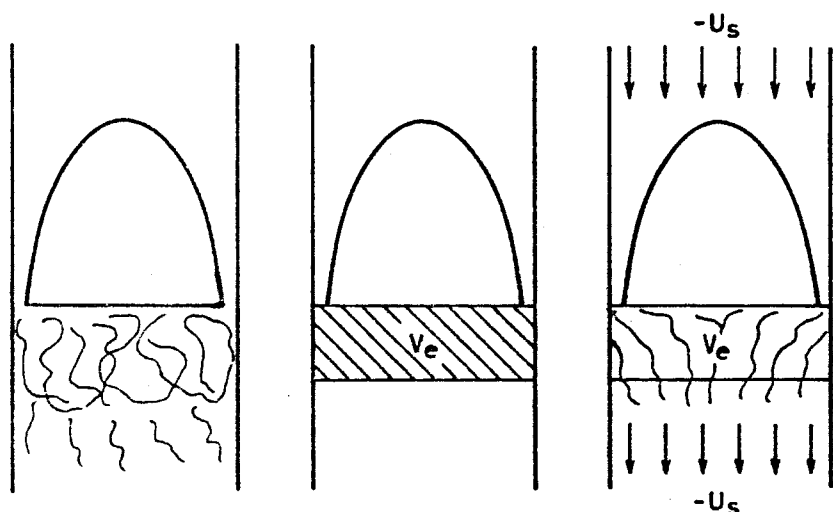


Figura 4.2 - Representação esquemática da esteira de um "slug" em ascensão numa coluna de água: a) situação real; b) aproximação da realidade, tomando um referencial fixo; c) aproximação, tomando um referencial preso ao "slug".

Uma melhor visualização da acção misturadora da esteira, pode ser conseguida por intermédio da Figura 4.3, que mostra nomeadamente:

a) O perfil de concentração inicial na coluna, desprezando a eventual acção misturadora no "instante" da injeção.

b) O perfil após a passagem do primeiro "slug". A forma da curva é a que se obtém à saída de um tanque bem agitado de volume V_e , que foi alimentado com uma perturbação em degrau de $c = c_0$ a $c = 0$ e decorre do balanço:

$$-V_e \frac{dc_e^*}{dt} = U_s A (c_s - c_e)$$

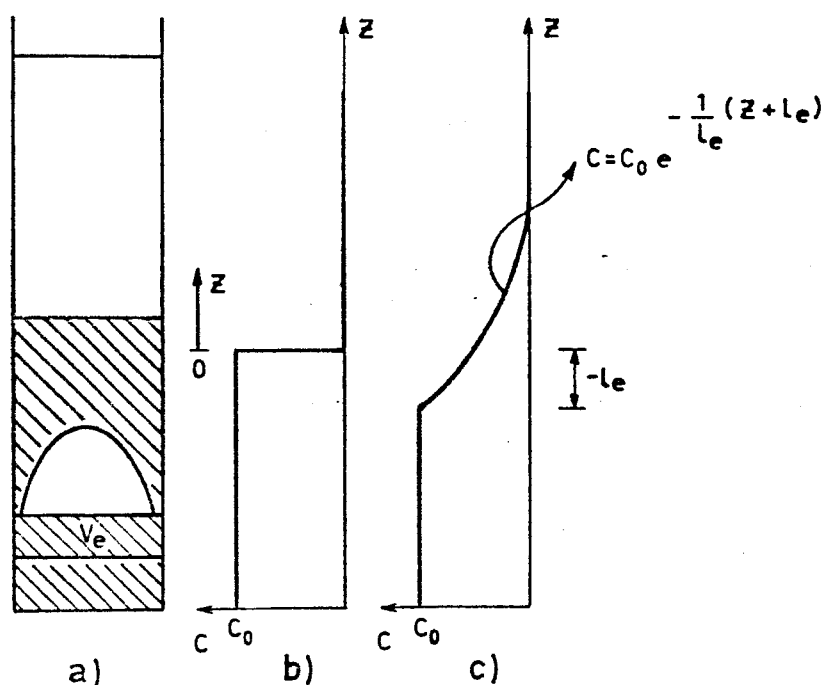


Figura 4.3 - a) Distribuição de soluto após a injeção do "slug", supondo que esta não provoca qualquer mistura axial; b) Perfil de concentração após a injeção do "slug"; c) Perfil de concentração após a ação da esteira de um "slug" - equação (4.2).

ou, notando que, $U_s = dz/dt$:

$$- \frac{V_e}{A} \frac{dc_e^*}{dz} = (c_s - c_e) \quad (4.1)$$

em que c_s e c_e são as concentrações de corante, respectivamente, à saída e à entrada da esteira e c_e^* é a concentração na esteira, suposta bem misturada. Como da hipótese de mistura perfeita, $c_e^* = c_s$, obtém-se da integração

da equação (4.1), com a condição inicial $c = c_o$ entre $-H_B < z < 0$ e $c = 0$ entre $0 < z < H_T$:

$$\begin{aligned} c &= c_o \exp \left(-\frac{z + \ell_e}{\ell_e} \right) & -\ell_e < z < H_T - \ell_e \\ c &= c_o & -H_B < z < -\ell_e \end{aligned} \quad (4.2)$$

em que como foi referido no Capítulo 2, $\ell_e (= V_e/A)$ representa o comprimento equivalente da esteira.

Para o segundo "slug", a equação (4.1) continua a ser válida, mas agora o perfil de concentração à entrada já não é um degrau, mas sim o perfil que fica após a passagem do primeiro "slug". O perfil após a passagem do segundo "slug" será a alimentação do terceiro "slug" e assim sucessivamente, sendo possível obter soluções analíticas para cada um destes perfis, já que se trata da alimentação de uma perturbação em degrau a uma cascata de "tanques" bem agitados (em número N igual ao número de "slugs" injectados):

$$\begin{aligned} c_N &= c_o \exp \left(-\frac{z + N \ell_e}{\ell_e} \right) \left[1 + \frac{z + N \ell_e}{\ell_e} + \frac{1}{2!} \left(\frac{z + N \ell_e}{\ell_e} \right)^2 + \dots \right. \\ &\quad \left. \dots + \frac{1}{(N-1)!} \left(\frac{z + N \ell_e}{\ell_e} \right)^{N-1} \right] & -N\ell_e < z < H_T \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$c_N = c_o \quad -H_B < z < -N\ell_e$$

Note-se contudo, que após a passagem de um número suficiente de

"slugs" ($N \ell_e \geq H_B$), as concentrações nos extremos deixam de ser as iniciais e a equação (4.3) deixa de ser uma boa tradução da realidade. O método numérico apresentado à frente permitiu ultrapassar este problema.

4.2.2 Introdução à noção de mistura provocada pela injeção dos "slugs".

A alimentação da esteira, como foi referido atrás, é feita pelo líquido que se encontra acima do "slug", pelo que, é necessário conhecer a distribuição de concentração de corante neste líquido. Se não houvesse outros efeitos, a distribuição de concentração acima de um "slug" seria a existente na coluna após a passagem do "slug" anterior. Contudo a introdução de cada "slug" na base da coluna provoca um avanço do líquido nela contido, que só por si, conduz a uma dispersão axial do mesmo, já que o avanço faz-se numa extensão que depende da posição radial. Só no caso limite do avanço do líquido ser pistão, é que não haveria dispersão axial (ver Figura 4.4b).

Aqui interessa para já considerar o avanço do líquido em escoamento de Poiseuille, ou seja, com perfil parabólico (ver Figura 4.4c), dado por:

$$h = \frac{2\Delta H_B}{3} \left[1 - (r/R)^2 \right] \quad (4.4)$$

em que ΔH_B representa a altura equivalente do "slug" na base da coluna (rever Capítulo 2).

O avanço médio do líquido (de cada secção recta) é ΔH_B e como in-

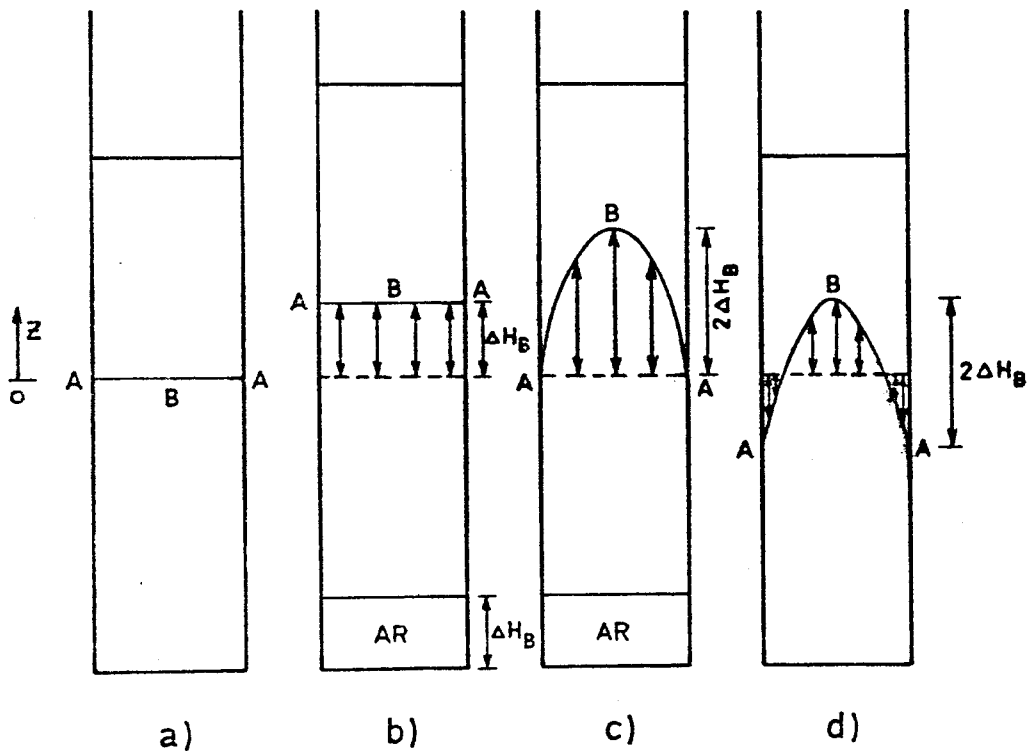


Figura 4.4 - Deslocamento da "linha de fluído" ABA devido à injeção do "slug" na coluna: a) "linha de fluído" ABA antes da injeção do "slug"; b) avanço em escoamento pistão; c) avanço em escoamento de Poiseuille; d) avanço, relativamente ao avanço médio, em escoamento de Poiseuille.

teressa considerar deslocamentos longitudinais relativamente a este avanço médio, podemos descrever estes por:

$$h^* = h - \Delta H_B = \Delta H_B [1 - 2 (r/R)^2] \quad (4.5)$$

os quais estão representados na Figura 4.4d.

Interessa agora ver como se pode quantificar a dispersão axial associada a este deslocamento. Este problema está intimamente relacionado com o analisado por Taylor (1953, 1954) e parte da análise é idêntica à daquele autor. A análise da situação em que inicialmente $c = c_0$ (constante) para $z < 0$ e $c = 0$ para $z > 0$, pode servir como ponto de partida. Após um avanço médio ΔH_B da coluna de líquido qual será a concentração em cada secção recta?

Adoptando uma nomenclatura apropriada para os desenvolvimentos posteriores, vamos chamar: $c_i(z)$ à concentração de corante à cota z , antes do avanço da coluna (isto é, antes da injeção do "slug"), considerando-se o líquido em cada secção recta homogeneizado; $c_{i+1}^*(z, r)$ aos valores pontuais da concentração de corante no ponto de coordenadas (z, r) após o avanço do líquido (c_{i+1}^* pode depender de z e r pois o líquido não está homogeneizado em cada secção recta, dado que o avanço é "laminar"); $\bar{c}_{i+1}(z)$ à concentração que se obteria, homogeneizando o líquido à cota z após a injeção do "slug". É importante notar que a cota z é sempre medida após descontro do avanço médio, isto é, a cota z é medida na coluna de líquido na ausência da bolha. Por razões que à frente se considerarão mais em detalhe, o conhecimento de $\bar{c}_{i+1}(z)$ é importante para o cálculo da mistura provocada pela subida de "slugs" em colunas de água. Note-se ainda que a difusão molecular no líquido é sempre desprezada em toda a análise, por ser demasiado lenta comparada com os outros processos de mistura.

A concentração média numa secção é pois, após a injeção do "slug", dada por:

$$\begin{aligned}\bar{c}_{i+1}(z) &= \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R c_{i+1}^*(r, z) 2\pi r dr = \\ &= \int_0^1 2 c_{i+1}^*(r', z') r' dr' \quad (4.6)\end{aligned}$$

em que $r' = r/R$.

Os valores de $c_{i+1}^*(r, z)$ vão depender da proveniência do elemento de fluído e por isso há que relacionar a posição radial com o deslocamento h^* através da equação (4.5), a qual após diferenciação apresenta a seguinte forma:

$$dh^* = - \Delta H_B \quad 4r' \quad dr' \quad (4.7)$$

Substituindo o valor de $r' \quad dr'$, da equação (4.7), no integral da equação (4.6), obtêm-se:

$$\bar{c}_{i+1}(z) = - \int_{\Delta H_B}^{-\Delta H_B} \frac{1}{2 \Delta H_B} c_{i+1}^*(r', z') \quad dh^* \quad (4.8)$$

A concentração $c_{i+1}^*(r', z)$ num ponto após a injeção do "slug" é determinada pela proveniência desse elemento de fluído através de:

$$c_{i+1}^*(r', z) = c_i(z-h^*) \quad (4.9)$$

em que h^* depende de r' conforme (4.5).

Substituindo em (4.8) obtêm-se finalmente:

$$\bar{c}_{i+1}(z) = - \int_{\Delta H_B}^{-\Delta H_B} \frac{1}{2 \Delta H_B} c_i(z - h^*) dh^* \quad (4.10)$$

que permite o cálculo de $\bar{c}_{i+1}(z)$ a partir do conhecimento de $c_i(z)$ e do avanço médio ΔH_B imprimido à coluna de líquido.

Esta expressão foi deduzida independentemente do conhecimento do perfil $c_i(z)$ e nesse sentido é geral, sendo no entanto de notar que ela não pode ser válida perto dos extremos superior e inferior da coluna, por razões mais ou menos óbvias que adiante serão detalhadas.

Considere-se como ilustração, a situação traduzida pelo seguinte perfil de concentração inicial:

$$c_0(z) = c_0 \quad z < 0$$

$$c_0(z) = 0 \quad z > 0$$

atrás referida como problema de Taylor. Após um avanço médio ΔH_B o perfil de concentrações médias nas secções rectas será, de acordo com a equação (4.10):

$$\begin{aligned} \bar{c}_{0+1}(z) &= c_0 & z < -\Delta H_B \\ \bar{c}_{0+1}(z) &= \frac{c_0}{2} - \frac{c_0}{2\Delta H_B} z & -\Delta H_B < z < \Delta H_B \\ \bar{c}_{0+1}(z) &= 0 & z > \Delta H_B \end{aligned} \quad (4.11)$$

o qual é idêntico ao apresentado por Taylor (1953).

Esta solução analítica pode ser obtida pelo facto de o perfil inicial ser muito simples. No caso em estudo de injeção de vários "slugs", só para o primeiro "slug" se pode obter esta solução simples. Para cada um dos "slugs" seguintes, o perfil $c_i(z)$ existente na coluna no momento da injeção é mais complicado e $\bar{c}_{i+1}(z)$ terá que ser calculado pela expressão (4.10) fazendo a integração numérica.

4.2.3 Detalhes adicionais para o estudo da mistura provocada pela passagem de "slugs"

O primeiro aspecto que importa focar é talvez a relevância dos perfis $\bar{c}_{i+1}(z)$. Após a passagem de um "slug", devido à boa mistura na respectiva esteira, é razoável supor que não há gradientes radiais de concentração e portanto o perfil $c_i(z)$ existente na coluna antes da entrada do "slug" seguinte, é uma boa aproximação da realidade. Imediatamente após a injeção do "slug" seguinte a distribuição de concentração de soluto na coluna é traduzida por $c_{i+1}^*(r, z)$ e apresentará normalmente gradientes radiais de concentração, como se ilustra na Figura 4.5 para uma distribuição inicial em degrau. Então, pode-se perguntar, qual o interesse do conhecimento de $\bar{c}_{i+1}(z)$ se na realidade não há mistura antes da passagem do "slug" e respectiva esteira?

O estudo da distorção nas zonas frontal e lateral do "slug", apresentado no Capítulo 3, mostrou (e adiante será confirmado) que para o tamanho de "slugs" considerados no presente estudo se pode muitas vezes despre-

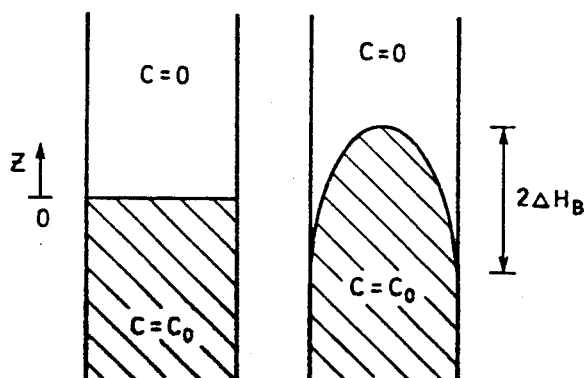


Figura 4.5 - Esquema ilustrativo da existência de gradientes radiais de concentração após a injeção de um "slug".

zar a mistura axial ocorrida nessas zonas. O mesmo é dizer que relativamente ao "slug", o deslocamento do líquido em torno deste (na zona frontal e lateral) pode ser considerado, em primeira aproximação, como ocorrendo empistão até à entrada na esteira. Uma vez que a esteira é suposta bem agitada, é irrelevante considerar os gradientes transversais (i.e, radiais) de concentração na sua alimentação. Efectivamente torna-se mais simples, calcular a concentração da corrente de entrada após mistura radial total. É isto que se faz ao considerar $\bar{c}_{i+1}(z)$. Este procedimento só é válido se a distorção do líquido até à entrada da esteira for desprezável e se a esteira puder ser considerada como bem agitada.

Um outro aspecto que importa considerar é o tratamento das regiões junto à base e topo da coluna aquando da injeção de cada "slug".

Considerando por exemplo o topo (ver Figura 4.6a), o avanço da coluna em escoamento de Poiseuille levaria à situação representada na Figura 4.6b, a qual é manifestamente irrealista do ponto de vista do comportamento

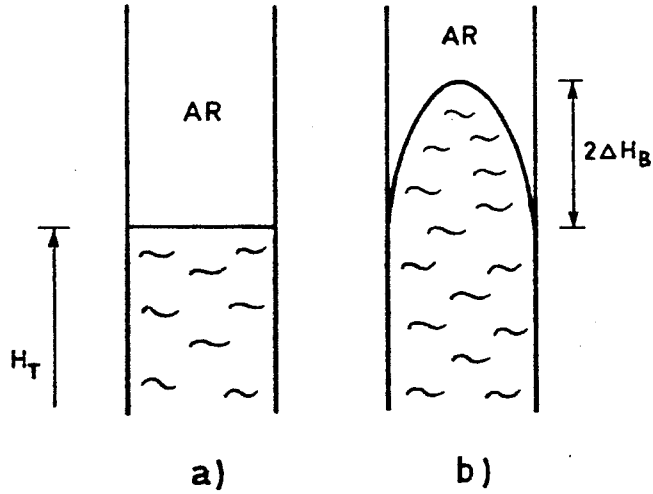


Figura 4.6 - Esquema do comportamento do topo da coluna, no caso da equação (4.10) ser tomada como válida desde $-H_B$ até H_T .

do líquido. A aproximação usada para resolver esta situação foi a de considerar a utilização da equação (4.10) apenas até $z = H_T - \Delta H_B$ (para a parte inferior considera-se (4.10) a partir de $z = -H_B + \Delta H_B$).

O líquido contido acima de $z = H_T - \Delta H_B$ é considerado como perfeitamente misturado, determinando-se a respectiva concentração através da expressão:

$$\bar{c}_{i+1} \text{ (topo)} = \frac{1}{\pi R^2 \Delta H_B} \int_{V_{\text{topo}}} c_i(z) 2\pi r dr dz \quad (4.12)$$

em que V_{topo} é o volume representado na Figura 4.7. A equação (4.12) pode ser escrita como:

$$\bar{c}_{i+1}(\text{topo}) = \frac{1}{\pi R^2 \Delta H_B} \int_0^R 2 \pi r \int_{H^*}^{H_T} c_i(z) dz dr \quad (4.13)$$

em que $H^* = H_T - 2 \Delta H_B [1 - (r/R)^2]$

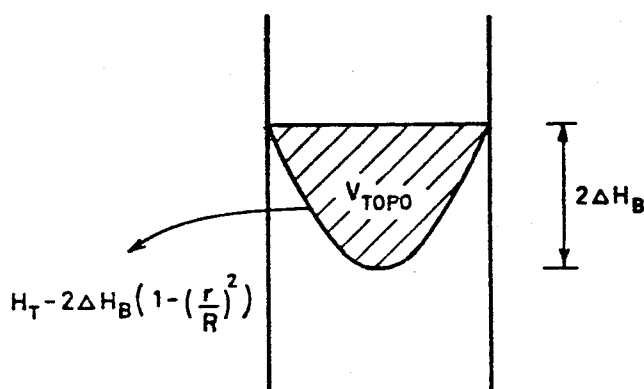


Figura 4.7 - Esquema da simulação da mistura no topo da coluna - e
quação (4.13).

O integral duplo no segundo membro tem que ser calculado numeri
camente.

Uma análise idêntica para a base da coluna permite chegar à expres
são:

$$\bar{c}_{i+1}(\text{base}) = \frac{1}{\pi R^2 \Delta H_B} \int_0^R 2 \pi r \int_0^{H^{**}} c_i(z) dz dr \quad (4.14)$$

em que $H^{**} = 2 \Delta H_B (r/R)^2$.

Note-se que esta maneira de aproximar o cálculo leva a que , quer

$\bar{c}_{i+1}$ (topo) (isto é, $\bar{c}_{i+1}$ de $H_T - \Delta H_B$ a H_T) quer $\bar{c}_{i+1}$ (base) (isto é, $\bar{c}_{i+1}$ de $-H_B$ a $-H_B + \Delta H_B$), representem uma descontinuidade relativamente aos valores $\bar{c}_{i+1}(H_T - \Delta H_B)$ e $\bar{c}_{i+1}(-H_B + \Delta H_B)$ calculados pelo integral (4.10). Contudo estas descontinuidades são pequenas e o procedimento adoptado parece razoável, por ser baseado numa aproximação que obedece à condição de conservação de massa (soluto). Não seria difícil melhorar a aproximação com vista a eliminar a descontinuidade, mas dadas as outras aproximações introduzidas nos cálculos, isso não foi considerado importante.

Um novo aspecto que interessa abordar aqui, é o do grau de aproximação com que o escoamento de Poiseuille representa o avanço da coluna de líquido decorrente da injeção do "slug". Um estudo detalhado deste processo é apresentado no Apêndice A, mas para a simulação da mistura em análise neste capítulo, basta conhecer o resultado desse estudo.

A conclusão mais importante deste apêndice, é que ao injectar um "slug" que promove um avanço médio ΔH_B da coluna de líquido, a distorção (dispersão axial) resultante pode ser descrita por um escoamento de Poiseuille com um avanço médio $\Delta H_B^* = \alpha \Delta H_B$, em que α estará sempre compreendido entre 0 e 1 e normalmente toma um valor próximo de 0,5 (ver Apêndice A).

Um último aspecto que importa abordar é a mistura do líquido provocada pela expansão do "slug" durante a subida.

O líquido que em cada instante se encontra acima do "slug", desloca-se devido à expansão deste, com uma velocidade média igual ao aumento de volume do "slug" por unidade de área da secção recta e de tempo:

$$v_m = \frac{1}{A} \frac{dV_s}{dt} \quad (4.15)$$

Considerando $V_s = A \cdot \Delta H_z$ e $U_s = dz/dt$, sendo ΔH_z a altura equivalente do "slug" quando este se encontra à cota z , a equação anterior pode escrever-se:

$$v_m = U_s \frac{d\Delta H_z}{dz} \quad (4.16)$$

Supondo que a expansão do ar se dá isotermicamente ($P V_s = \text{const.} = a$) e relacionando a variação de pressão hidrostática ao longo da coluna ($dP = -\rho g dz$) com a velocidade do "slug", é possível quantificar a variação de ΔH_z ao longo da coluna:

$$\frac{d\Delta H_z}{dz} = \frac{A \rho g}{a} \Delta H_z^2 \quad (4.17)$$

O valor da velocidade média do líquido em cada instante, dado pela conjugação das equações (4.16) e (4.17), é reduzido, mesmo em condições desfavoráveis, tais como "slugs" de elevado tamanho a subirem em colunas de água. Assim, $Re (= \frac{v_m D}{\nu})$ é menor do que 2100 sendo o escoamento do líquido, provocado pela expansão, de Poiseuille.

No que respeita à dispersão axial associada a este deslocamento, ela é pois idêntica à provocada pela injeção, sendo possível calcular a concentração $\bar{c}_{i+1}(z)$ através da equação (4.10).

Contudo vai existir uma dificuldade, já que o deslocamento médio sofrido por cada secção recta de líquido é função da sua cota inicial; isto deve-se ao facto do líquido que o "slug" vai deixando para trás, deixar de sofrer a acção da expansão. Exemplificando, numa coluna de 2,0 m de altura ($H_B + H_T = 2,0 \text{ m}$), o líquido que se encontra inicialmente no plano da base ($z = -H_B$) sofre um deslocamento médio nulo, enquanto que o que se encontra no topo ($z = H_T$) sofre um deslocamento que é aproximadamente 20% do deslocamento médio provocado pela injeção ($\Delta H_{\text{expa}} = 0,20 \Delta H_B$).

De forma a tornar possível a simulação da mistura resultante da expansão e tendo em consideração que a maior variação de concentração se dá a meio da coluna (na maioria das experiências efectuadas $H_B \approx H_T$), tomou-se o avanço médio de qualquer secção, como sendo igual ao sofrido pela secção que se encontra inicialmente a meio da coluna (como exemplo, numa coluna de 2,0m o avanço médio, de qualquer secção, foi tomado como sendo $\Delta H_{\text{expa}} = 0,10 \Delta H_B$).

Ultrapassada esta dificuldade e pelo facto deste deslocamento ser consecutivo ao provocado pela injeção (após o deslocamento provocado pela injeção, a alteração seguinte das posições dos elementos de uma secção recta de fluído é devida à expansão do "slug"), torna-se possível adicionar os efeitos provocados por estes dois mecanismos. Esta associação é feita em maior detalhe no Apêndice A, traduzindo-se apenas numa alteração do valor do parâmetro α .

4.3 Descrição detalhada da simulação da mistura resultante da passagem de um conjunto de "slugs" numa coluna de água

Com base nas ideias desenvolvidas nas secções anteriores, é possível apresentar agora em detalhe o método de simulação numérica das experiências que vão ser descritas na secção 4.4.

O objectivo da simulação é calcular o perfil de concentração de soluto (corante) numa coluna de água, inicialmente com distribuição $c = c_0$ entre $-H_B < z < 0$ e $c = 0$ entre $0 < z < H_T$, após passagem de uma série de N "slugs" de ar de igual tamanho ΔH .

A simulação é baseada na ideia de que os mecanismos significativos de mistura são:

- i) O deslocamento global para cima da coluna de líquido (deslocamento tipo Poiseuille)
- ii) A passagem do líquido na esteira de cada "slug".

O único parâmetro livre para ajuste na simulação é o volume V_e da esteira, ou, o que é o mesmo, o seu comprimento equivalente, l_e . Para cada situação concreta, procedeu-se à simulação com diversos valores de l_e , comparando-se os perfis de concentração obtidos com o observado experimentalmente, de modo a escolher o melhor valor de l_e que caracteriza a mistura.

Segue-se a descrição detalhada do método de cálculo.

A altura total ($H_T + H_B$) é discretizada num conjunto de pontos z_j , usando-se dois tamanhos de malha: uma malha mais apertada, com acréscimos Δz (meio), para cobrir um intervalo definido para a direita e esquerda de $z = 0$

e uma malha mais larga, com acréscimos Δz (extremos), para cobrir o resto da coluna. Este procedimento tem em vista melhorar a aproximação numérica na zona em que ocorrem as maiores variações de concentração.

Para o tamanho de "slug" considerado, calcula-se $\Delta H_B^* = \alpha_T \Delta H_B$, conforme indicado no Apêndice A e por aplicação das equações (4.13) e (4.14) para os extremos e (4.10) para o resto da coluna, $\bar{c}_{0+1}(z)$. Note-se que, o cálculo de $\bar{c}_{0+1}(z)$ junto de $z = 0$ é analítico - ver equação (4.11) - e a descontinuidade inicial não oferece por conseguinte problemas numéricos.

Em seguida, toma-se o perfil $\bar{c}_{0+1}(z)$ como a alimentação à esteira em ascensão e calcula-se o perfil $c_1(z)$, que resulta da passagem desta esteira ao longo de toda a coluna. Como já foi referido, a esteira pode ser concebida como um tanque bem agitado de volume V_e alimentado ao caudal $Q = U_s A$. Do balanço material à esteira - equação (4.1) - resultou:

$$-l_e \frac{dc_e}{dz} = c_s - c_e$$

que pode agora ser escrito da seguinte forma:

$$\frac{dc_1(z)}{dz} = \frac{\bar{c}_{0+1}(z+l_e) - c_1(z)}{l_e} = f(c_1(z), z) \quad (4.19)$$

A concentração em cada ponto da coluna, após a acção da esteira, $c_1(z)$, pode ser conhecida, bastando para tal resolver numericamente a equação (4.19), após especificação de uma condição inicial - a concentração que fica na base da coluna após a formação da esteira, $c_1(-H_B)$.

Considerou-se uma boa aproximação, tomar para este valor, o da concentração média do líquido que existia na base da coluna, após a injeção do "slug" (num comprimento igual ao da esteira):

$$c_1(-H_B) = \frac{1}{\ell_e} \int_{-H_B}^{-H_B + \ell_e} \bar{c}_{0+1}(z) dz \quad (4.20)$$

O método numérico utilizado para determinar $c_1(z)$ - equação (4.19) - foi o designado por Runge-Kutta de 4.^a ordem, Hornbeck (1980), o qual é descrito de seguida, de uma forma sucinta, tomando como exemplo o cálculo de $c_1(-H_B + \Delta z)$:

$$\begin{aligned} c_1(-H_B + \Delta z) = & c_1(-H_B) + \Delta z \left[\frac{1}{6} f(c_1(-H_B), -H_B) + \right. \\ & + \frac{1}{3} f(\dot{c}_1(-H_B + \Delta z/2), -H_B + \Delta z/2) + \\ & + \frac{1}{3} f(\ddot{c}_1(-H_B + \Delta z/2), -H_B + \Delta z/2) + \\ & \left. + \frac{1}{6} f(\dot{c}_1(-H_B + \Delta z), -H_B + \Delta z) \right] \end{aligned} \quad (4.21)$$

em que:

$$\dot{c}_1(-H_B + \Delta z/2) = c_1(-H_B) + \frac{\Delta z}{2} f(c_1(-H_B), -H_B)$$

$$\ddot{c}_1(-H_B + \Delta z/2) = c_1(-H_B) + \frac{\Delta z}{2} f(\dot{c}_1(-H_B + \Delta z/2), -H_B + \Delta z/2)$$

$$\dot{c}_1(-H_B + \Delta z) = c_1(-H_B) + \Delta z f(\ddot{c}_1(-H_B + \Delta z/2), -H_B + \Delta z/2)$$

É de notar que $\bar{c}_{0+1}(-H_B + \ell_e)$, $\bar{c}_{0+1}(-H_B + \ell_e + \Delta z)$ e $\bar{c}_{0+1}(-H_B + \ell_e + \Delta z/2)$, poderão não ser conhecidos à partida; isto acontece desde que $\ell_e/\Delta z$ não seja um número inteiro. Contudo, cada um destes valores estarão enquadrados por dois valores da malha conhecidos, sendo então determinados por simples interpolação.

Este processo de cálculo - exemplificado para $c_1(-H_B + \Delta z)$ - é continuado até que $z = H_T - \ell_e$, pois aí deixa de haver alimentação à esteira. Toma-se então:

$$c_1(z) = c_1(H_T - \ell_e) \quad z > H_T - \ell_e \quad (4.22)$$

por razões óbvias.

Está assim demonstrado o cálculo do perfil $c_1(z)$ após passagem do "slug". Este perfil vai agora servir de base ao cálculo de $\bar{c}_{1+1}(z)$ por meio das equações (4.13), (4.14) e (4.10). De novo por aplicação das equações (4.19), (4.21) e (4.22), obtém-se $c_2(z)$, o perfil após passagem do 2º "slug". O procedimento pode agora ser repetido até se obter o perfil $c_N(z)$ desejado, para comparação com o experimental.

O cálculo numérico dos integrais que aparecem nas equações acima referidas, é feito aplicando a regra dos trapézios. Exemplificando para a equação (4.10):

$$\begin{aligned} \bar{c}_{1+1}(z) = & \frac{\Delta z}{4\Delta H_B} [c_1(z - \Delta H_B) + c_1(z + \Delta H_B) + \\ & + 2 \sum_{j=2}^{J-1} c_1(z - h^*)] \end{aligned} \quad (4.23)$$

em que $J (= \frac{2\Delta H_B}{\Delta z} + 1)$ representa o número de pontos do intervalo $[z - \Delta H_B, z + \Delta H_B]$, onde é conhecida a concentração $c_1(z - h^*)$. Saliente-se que na simulação Δz foi escolhido de forma a J ser sempre um número inteiro.

4.3.1 Tamanho da malha e critérios de verificação da precisão do método numérico

Foram basicamente três os critérios que presidiram à escolha da dimensão da malha a usar, nomeadamente:

i) Os perfis resultantes da simulação da acção misturadora da esteira (não considerando a mistura provocada pela injeção, $\alpha_T = 0$) dos 20 primeiros "slugs" não apresentarem desvios, em qualquer ponto z da coluna, superiores a 0,1% dos obtidos através da equação (4.3) - resposta de uma cascata de tanques em série a uma perturbação em degrau na sua alimentação.

ii) Após a simulação da acção de N "slugs" (quer da esteira, quer da injeção), o cálculo da quantidade de corante na coluna:

$$m' = \pi R^2 \int_{-H_B}^{H_T} c_N(z) \cdot dz \quad (4.24)$$

não apresentar um desvio superior a 0,2% em relação à massa de corante no início da simulação:

$$m = c_o \pi R^2 H_B \quad (4.25)$$

iii) Como já foi referido, a razão $\Delta H_B / \Delta z$ ser um número inteiro.

Como exemplo, pode citar-se que na simulação da mistura provocada por "slugs" com $\Delta H_B = 50$ mm, numa coluna de 19 mm de diâmetro interno, o valor de Δz que satisfaz os critérios anteriores, é de aproximadamente 1 mm (o que numa situação em que $H_B + H_T = 2,0$ m, se traduz em dividir a coluna numa malha de 2.000 pontos). Este número exagerado de pontos obrigava a um tempo de cálculo demasiado elevado. Para ultrapassar este problema, sem perda de rigor na simulação, tomaram-se as seguintes opções:

i) Usar uma malha mais apertada no meio da coluna, Δz (meio), do que nos extremos, Δz (extremos) — $2 \Delta z$ (meio) = Δz (extremos). Esta opção tem como justificação o facto de ser no meio da coluna que se observam as maiores variações de concentração.

ii) Após a simulação dos 20 primeiros "slugs", duplicar o tamanho da malha, tanto no meio, como nos extremos. Tomar igual medida após a simulação dos 50 primeiros "slugs". A justificação é dada pelo facto de para número crescente de "slugs" simulados, o perfil se ir atenuando ao longo de toda a coluna.

Convém porém referir, que estas opções não violaram os critérios

que presidiram à escolha de Δz , muito particularmente o segundo critério (m e m' continuaram a apresentar desvios inferiores a 0,2%).

4.4 Estudo experimental

O objectivo desta secção é descrever a instalação experimental utilizada para estudar a mistura resultante da introdução de um ou mais "slugs" na base de uma coluna vertical, que contém água corada desde a base, $z = -H_B$, até $z = 0$ e água sem corante desde $z = 0$ até ao topo, $z = H_T$. (rever Figura 4.1).

A execução experimental deste estudo levantou inicialmente vários problemas, nomeadamente: escolha do corante, sistema a usar para a injeção do "slug", concretização da distribuição inicial do corante e sistema de amostragem do líquido.

4.4.1 Escolha do corante

O corante a utilizar tinha que apresentar as seguintes propriedades:

i) Não reagir com os materiais com os quais contacta na coluna de teste.

ii) Apresentar um forte poder de coloração, isto é, dar forte coloração utilizando uma baixa concentração de corante; caso contrário as soluções, corada e não corada, apresentariam propriedades físicas (densidade, viscosidade) diferentes, o que impediria o estudo isolado da acção mis

turadora do "slug".

iii) As soluções aquosas de corante obedeceram à lei de Beer, isto é, a absorvância de um feixe de luz, a um certo comprimento de onda, ser função linear da concentração de corante na solução. Caso contrário a análise espectrofotométrica seria mais complicada.

Após vários testes com diferentes corantes optou-se pelo "Rouge Solophenyle 6BL", usualmente utilizado como corante na Indústria Têxtil, o qual satisfaz os requisitos acima referidos.

4.4.2 Sistema de injeção do "slug"

O sistema de injeção do "slug" a utilizar, tinha que apresentar as seguintes características:

- i) Possibilitar a injeção rápida do ar, de modo a formar-se uma bolha de elevado tamanho ("slug").
- ii) Permitir, em dadas condições operatórias, a reprodução da injeção de bolhas de igual tamanho na base da coluna.
- iii) Permitir variar o volume das bolhas por ajuste exterior.
- iv) Permitir a injeção de sequências de bolhas idênticas a diferentes ritmos.

Para satisfazer estes requisitos, adoptou-se a montagem representada na Figura 4.8.

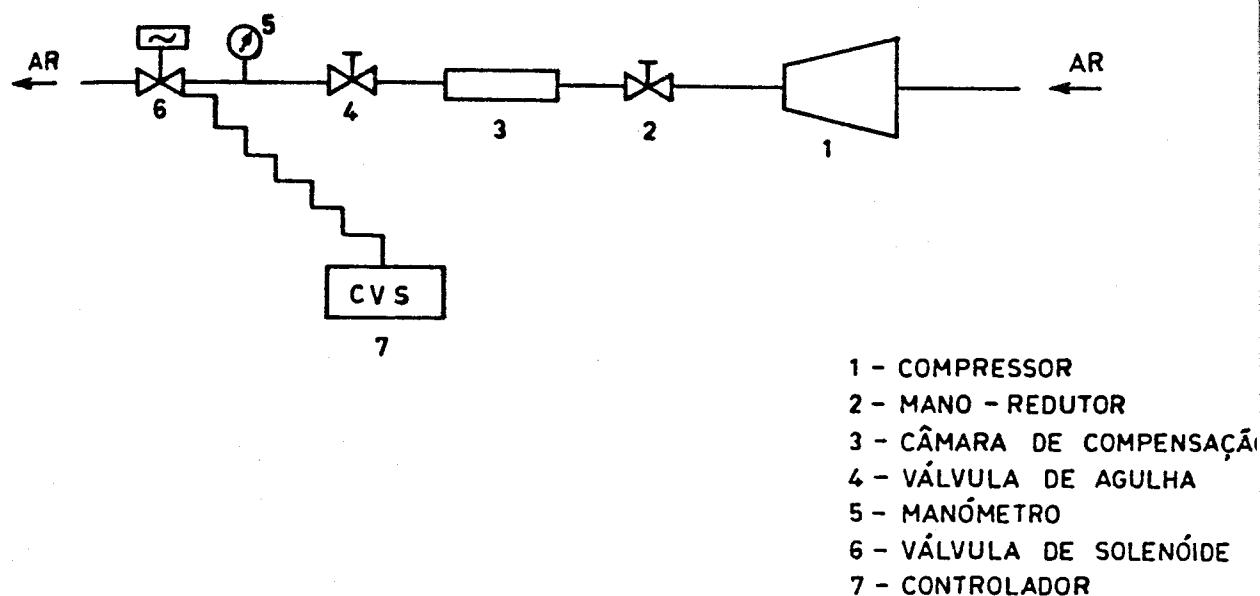


Figura 4.8 - Representação esquemática do sistema de injeção do "slug" na coluna.

O mano-redutor, montado à saída de uma das linhas de ar comprimido do laboratório, permitia ajustar a pressão de operação. A ligação do mano-redutor à válvula de agulha era feita por um tubo de elevado volume, volume este que era ainda reforçado pelo de uma câmara de compensação montada antes da válvula de agulha. O volume total assim conseguido (aproximadamente 25 l), permitia manter a pressão praticamente constante a montante da válvula de agulha durante o tempo de abertura da válvula de solenóide. Nestas condições era possível obter um escoamento reproduzível, isto é, a injeção, sob determinadas condições operatórias, de "slugs" sempre do mesmo tamanho.

A válvula de agulha permitia controlar o caudal de ar injectado durante o tempo de abertura da válvula de solenóide.

A válvula de solenóide era comandada por um gerador de impulsos , construído para o efeito e que permitia tempos de abertura da válvula des de 0,1 s até 10 s, a uma frequência superior a 1 "slug" por minuto.

4.4.3 Distribuição inicial de corante

No início de cada experiência pretendia-se que o perfil de concentração de corante na coluna apresentasse a forma de um "degrau". Para isso, instalou-se na região de separação pretendida ($z = 0$) uma válvula de esfera (tipo tudo ou nada - ver Figura 4.9) que quando aberta tinha um diâmetro interno igual ao da coluna.

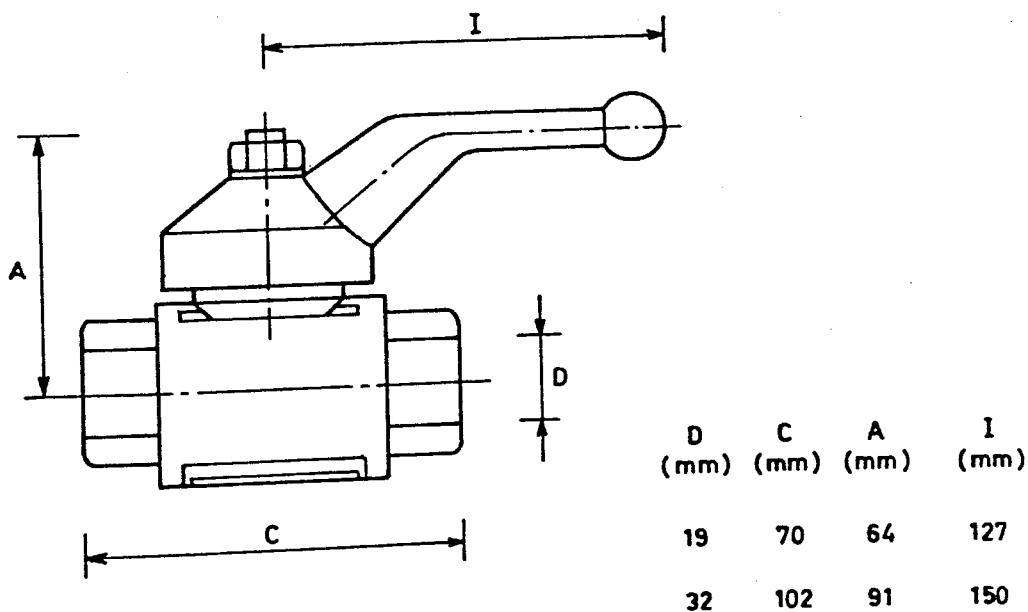


Figura 4.9 - Representação das válvulas de esfera utilizadas no estudo experimental.

Com a válvula aberta introduzia-se na coluna a solução corada até um pouco acima desta válvula. Esta era então fechada e a secção superior da coluna lavada e em seguida cheia, com solução não corada, até ao nível desejado. A válvula de esfera só era novamente aberta imediatamente antes da injeção do primeiro "slug". Assim, evitava-se a mistura dos líquidos (corado e não corado) durante o enchimento da coluna e obtinha-se uma separação praticamente plana (perpendicular ao eixo da coluna) no início de cada experiência.

Foram utilizadas colunas (e portanto válvulas de esfera) de 19 e 32 mm, sendo o método de disposição inicial do líquido o mesmo para ambos os diâmetros. A altura de líquido utilizada nas experiências variou entre 2 e 3 m.

4.4.4 Sistema de amostragem

Na coluna de menor diâmetro ($D = 19$ mm) ao serem recolhidas, através de tomas laterais, amostras de volume significativo (da ordem dos 5 cm^3), desenvolvia-se um escoamento laminar na coluna de líquido. O líquido amostrado, acabava por ser proveniente de uma gama alargada e indefinida de cotas, falseando os resultados obtidos.

Para ultrapassar este problema, concebeu-se uma coluna constituída alternadamente por secções de amostragem construídas em aço inox (ver Figura 4.10) e válvulas de esfera, ambas de igual diâmetro interno (ver Figura 4.11). As válvulas, quando fechadas, permitiam isolar as porções de líquido que se pretendiam recolher, tendo-se assim a certeza da gama de co

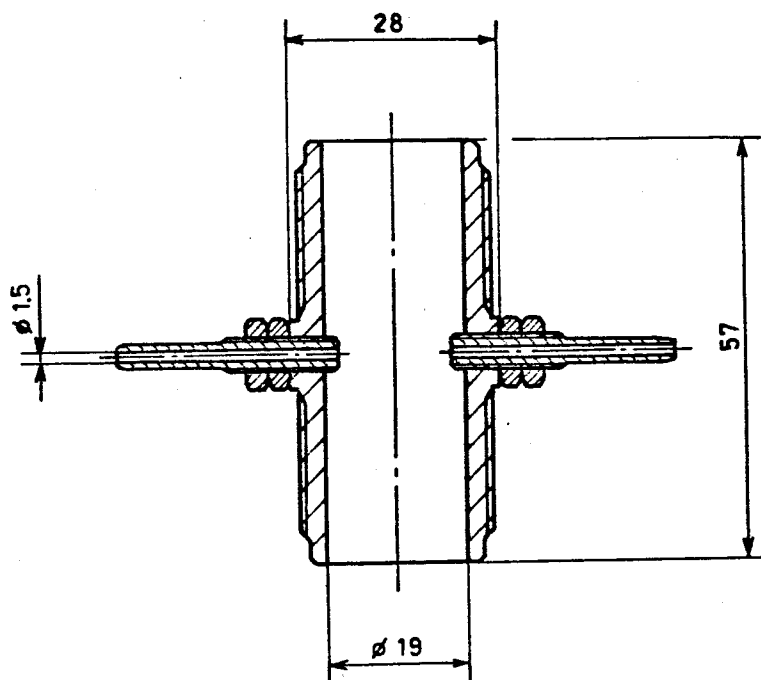


Figura 4.10 - Representação em corte de uma secção de amostragem da coluna de 19 mm.

tas ocupada pelo líquido amostrado.

Uma vez que a coluna assim constituída tinha grandes porções opacas, colocou-se na base e no topo secções de vidro acrílico transparente que permitiam ver qualquer defeito nos "slugs" formados (por exemplo, deficiente coalescência)

Na coluna de 32 mm de diâmetro, o problema da distorção na amostragem não se pôs, pois o volume amostrado (na ordem dos 5 cm³) traduzia-se numa muito menor descida do nível de líquido na coluna (aproximadamente 6 mm). Assim, optou-se pela alternativa mais simples e muito mais barata de colocar tomas de amostragem "capilares" ao longo da parede da coluna construída em vidro acrílico transparente (ver Figura 4.12).

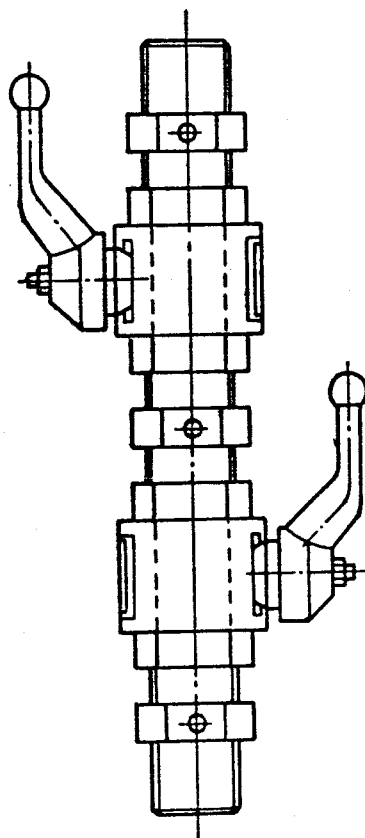


Figura 4.11 - Representação de uma parte da coluna de 19 mm de diâmetro interno.

4.4.5 Modo de operação

4.4.5.1 Suporte da coluna

Foi construído um perfil em ferro de aproximadamente 2 m de altura, munido a meio de um eixo de rotação. Este eixo permitia rodar a coluna facilitando o seu manuseamento, nomeadamente as operações de lavagem e amostragem.

As colunas eram presas ao perfil por meio de garras adequadas, as

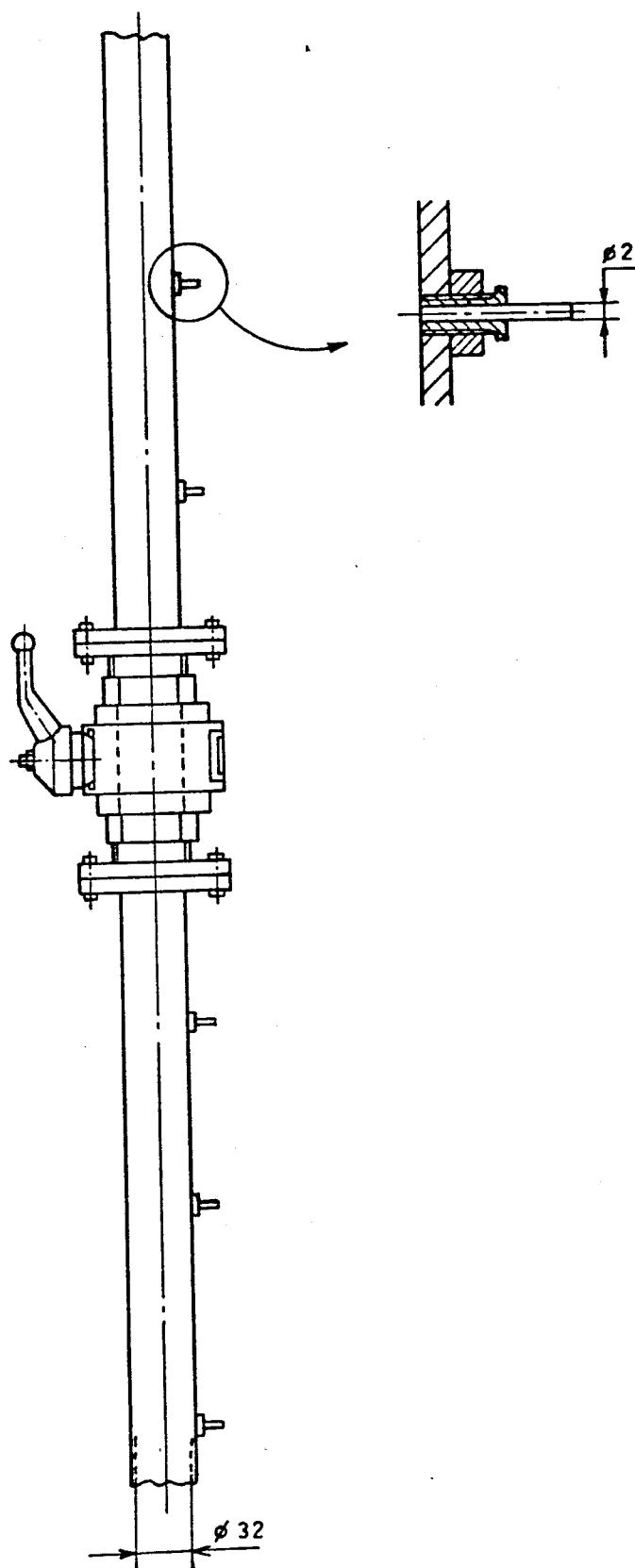


Figura 4.12 - Representação da coluna de 32 mm de diâmetro interno.

quais permitiam aprumar a coluna num plano definido por ela própria e pelo perfil de ferro. O aprumo no plano perpendicular ao eixo de rotação era feito por intermédio de dois batentes laterais ajustáveis.

4.4.5.2 Ajuste do tamanho do "slug"

O tamanho do "slug" injectado era caracterizado pelo volume de líquido deslocado, medido no instante em que o "slug" atingia o topo da coluna, isto é, igual ao volume de ar injectado medido à pressão atmosférica, ΔH . Assim, medindo a altura da coluna de líquido imediatamente antes e após o "slug" rebentar à superfície, obtinha-se o tamanho do "slug" injectado.

Para se injectar um "slug" com um tamanho previamente estabelecido, começava-se por ajustar o mano-redutor (rever Figura 4.8) para uma pressão de operação arbitrária. Fixava-se no controlador da válvula de solenóide um tempo de abertura o mais pequeno possível (na ordem dos 0,3 s) e operando com a válvula de agulha tentava-se obter o volume pretendido. Caso não se conseguisse obter o tamanho desejado, privilegiava-se a opção de regular nova pressão de operação, relativamente a alterar o tempo de abertura da válvula de solenóide, garantindo-se assim uma rápida coalescência do ar na base da coluna.

4.4.5.3 Controlo da temperatura de operação

Com o intuito de evitar escoamento na coluna de líquido devido a correntes de convecção natural, procurava-se que a temperatura de operação fosse próxima da ambiente.

A câmara de compensação e o tubo de ligação entre a válvula de agulha e o mano-redutor (rever Figura 4.8), permaneciam mergulhados num banho termostatzado à temperatura ambiente.

Ambas as soluções (corada e não corada) a introduzir na coluna , encontravam-se igualmente mergulhadas nesse banho até ao momento de serem utilizadas.

4.4.5.4 Amostragem

Logo após a injeção do último "slug", realizava-se a amostragem.

Na coluna de 32 mm recolhiam-se as amostras (≈ 5 mL) de cima para baixo pelos capilares.

Na coluna de 19 mm, fechavam-se rapidamente todas as válvulas de esfera, em seguida rodava-se a coluna (e suporte) de cerca de 90° e também por capilares (dois em cada secção de amostragem - rever Figura 4.10), recolhia-se todo o líquido contido entre cada duas válvulas de esfera (≈ 15 mL).

4.4.6 Análise espectrofotométrica

O espectrofotômetro utilizado foi um ITACHI MODELO 100-20, com linearizador incorporado.

O comprimento de onda de máxima absorção para a solução de "Rouge Solophenyle 6BL" foi previamente determinado e era 510 nm.

A calibração a este comprimento de onda mostrou que se podiam analisar concentrações de corante deste ≈ 0 até 8×10^{-2} g/l, já que a resposta (absorvância em função da concentração) era linear nesta gama.

Dispondo de um linearizador incorporado e pretendendo-se obter a razão c/c_0 (c_0 representa a concentração inicial), era possível, fornecendo ao espectrofotômetro o valor aproximado de c_0 (a menos do erro cometido na preparação da solução), obter directamente (digitalmente) os valores da concentração de cada amostra (sempre referenciados a c_0). Note-se que a razão c/c_0 é independente do erro experimental cometido na preparação da solução inicial (c_0).

Devido ao espectrofotômetro apresentar duas gamas de leitura de diferente sensibilidade, baixos e elevados valores da concentração eram dados, respectivamente, com quatro e três dígitos. Entrando com o erro de leitura e com os erros inerentes ao espectrofotômetro, estimou-se o erro de cada análise como sendo $\pm 5 \times 10^{-5}$ g/l.

4.5 Apresentação e discussão dos resultados experimentais - comparação com os obtidos por simulação

4.5.1 Experiências efectuadas injectando isoladamente os "slugs"

Em todas as experiências cujos resultados são apresentados nesta secção, os "slugs" foram injectados isoladamente, isto é, cada "slug" só era injectado quando o anterior já tinha chegado ao topo.

Em seguida são apresentados e discutidos os resultados obtidos na coluna de maior diâmetro ($D = 32 \text{ mm}$), na qual como já foi analisado, tanto a mistura provocada pelo escoamento do líquido em torno do "slug" (Capítulo 3), como a provocada pela injeção do "slug" (Apêndice A), não se devem apresentar, à partida, dominantes quando comparados com a mistura provocada pela esteira.

4.5.1.1 Experiências realizadas na coluna de diâmetro interno 32 mm

Nas Figuras 4.13 a, b, c, estão representadas os perfis (c/c_0) obtidos experimentalmente com "slugs" de $\Delta H = 30, 60, 90$ e 125 mm . A altura total de líquido na coluna nestas experiências foi sempre $2,60 \text{ m}$ ($H_B = 1,20 \text{ m}$ e $H_T = 1,40 \text{ m}$). A forma de representação dos perfis permite a sua comparação imediata.

É evidente a sobreposição dos perfis, independentemente do tamanho dos "slugs" injectados; isto é, a mistura provocada pela passagem de N "slugs", não depende de ΔH .

Uma vez que:

i) a mistura provocada pela injeção dos "slugs" é tanto mais acentuada quanto maiores forem os "slugs";

ii) a mistura devida ao escoamento do líquido nas regiões frontal e lateral é tanto maior quanto maiores forem os "slugs";

iii) a acção misturadora da esteira aumenta com o tamanho do "slug", ΔH , até um certo ponto a partir do qual se torna constante;

só há uma interpretação possível para a coincidência (a igual número N de "slugs" injectados) dos perfis representados naquelas figuras, a saber: a mistura induzida pela esteira é largamente dominante sobre as outras fontes de mistura (injeção e escoamento nas zonas frontal e lateral) e para $\Delta H > 30$ mm o comprimento da esteira já não varia com ΔH . De seguida passamos a analisar separadamente cada fonte de mistura, de forma a dar suporte a esta interpretação, obtida, repetimos, com base na análise dos perfis experimentais.

Como é referido no Apêndice A, a mistura provocada pela injeção (e pela expansão do "slug" durante a subida), é caracterizada pelo tipo de escoamento (expresso no valor de α_T) que a coluna de líquido sofre, quando na sua base se injecta um "slug". Nas Figuras 4.14 a, b, c, d, estão representados os perfis obtidos por simulação (acção da esteira tomada como constante e caracterizada por $\lambda_e = 2,8 D$), para, respectivamente, "slugs" com $\Delta H = 30, 60, 90$ e 125 mm. As curvas traçadas em cada gráfico, correspondem a diferentes tipos de escoamento do líquido durante a injeção, nomeadamente:

i) Deslocamento pistão da coluna; situação em que a injeção não provoca qualquer mistura do líquido, $\alpha_T = 0,13$, curvas representadas a chei-

o (—).

ii) Deslocamento referido no Apêndice A como o que melhor descreve a realidade, $0,53 \leq \alpha_T \leq 0,63$.

iii) Deslocamento de Poiseuille; situação de mistura máxima provocada pela injeção, $\alpha_T = 1,13$.

Recorde-se que o parâmetro α_T engloba o escoamento provocado pela expansão do "slug" durante a subida, o qual deve ser, em qualquer caso, de Poiseuille.

Como se pode ver na Figura 4.14 a, se $\Delta H = 30$ mm, a contribuição para a mistura total, do escoamento durante a injeção, é praticamente nula, independentemente do número de "slugs" (comparação das curvas obtidas por simulação tomando α_T igual a 0,13 e 1,13). Com um aumento de ΔH , esta contribuição começa a fazer-se sentir, em especial, nos extremos da coluna, nunca sendo porém muito acentuada; o desvio máximo de concentração verificado (topo da coluna após se terem injectado 150 "slugs" de tamanho $\Delta H = 125$ mm) é reduzido ($c/c_0 = 0,18$ se $\alpha_T = 0,13$, $c/c_0 = 0,20$ se $\alpha_T = 0,53$ e $c/c_0 = 0,21$ se $\alpha_T = 0,63$).

Após esta análise, não parece difícil de aceitar o facto da mistura resultante da injeção ser desprezável em face da resultante da acção da esteira. Os pequenos desvios encontrados poderão ser atribuídos ao facto do escoamento adoptado para simular o resultante da injeção, conduzir a estimativas por excesso da acção misturadora no processo de injeção (ver Apêndice A).

Da análise do Capítulo 3, ficou claro que a mistura provocada pe-

lo escoamento em torno do "slug", era função do comprimento do "slug" (rever Figura 3.28). O atraso da maioria (90%) dos elementos de fluído, em relação ao elemento mais rápido, durante o escoamento nas zonas frontal e lateral, foi nesse capítulo o parâmetro escolhido para quantificar a mistura resultante. Se este atraso for de uma ordem de grandeza inferior ao tempo que se espera que os elementos de fluído permaneçam na esteira, a hipótese de mistura desprezável durante esta etapa (zonas frontal e lateral) apresentar-se-á correcta e vice-versa. Para se estabelecer esta comparação, recorde-se que a acção da esteira foi comparada à de um "tanque" perfeitamente agitado de volume $V_e (= A \ell_e)$. O tempo de residência, t_r , num "tanque" deste tipo, é dado pela razão entre o seu volume e o caudal de líquido ($Q = U_s A$) que o percorre ($t_r = V_e/Q = \ell_e/U_s$); isto é, pelo tempo que o "slug" demora a percorrer uma distância igual ao comprimento da esteira.

É então conveniente desde já fazer uma estimativa do comprimento da esteira que melhor ajusta os resultados experimentais obtidos (que como já se viu são independentes de ΔH).

Na Figura 4.15, as linhas contínuas representam os perfis obtidos por simulação considerando $\ell_e = 2,8 D$ e deslocamento pistão durante a injecção ($\alpha_T = 0,13$), sendo os pontos, os valores experimentais (que como se viu são os mesmos para os vários valores de ΔH) após passagem de 50, 100, 150 e 300 "slugs". É de realçar a boa concordância, em especial pelo facto dela não depender do número de "slugs" injectados.

A sensibilidade da mistura provocada pelos "slugs" ao valor de ℓ_e escolhido, pode ser apreendida da Figura 4.16. Os diferentes perfis repre-

sentados mostram a mistura provocada por esteiras com comprimentos desde $\ell_e = 2,5 D$ até $3,0 D$ (incrementos de $0,1 D$). É evidente a sensibilidade de mistura a uma variação de ℓ_e , o que permite afirmar que o valor encontrado ($\ell_e = 2,8 D$) deve apresentar um erro relativo inferior a 5%.

Tomando então $\ell_e = 2,8 D$, pode-se determinar o tempo de residência do líquido na esteira, $t_r = \frac{2,8 D}{U_s}$; a permanência média dos elementos de fluído na esteira é pois igual ao tempo que o "slug" demora a percorrer 2,8 diâmetros de coluna. Este resultado, justifica o facto da análise da importância do atraso no tempo sofrido pelo líquido no escoamento em torno do "slug", ter sido feita no Capítulo 3 tomando como termo de comparação o tempo que um "slug" demora a percorrer um diâmetro de coluna (rever Figura 3.28). Basta agora refazer esta análise, tomando como termo de comparação o tempo que o "slug" demora a percorrer 2,8 diâmetros de coluna. A Tabela 4.1, mostra os resultados desta análise.

A ordem de grandeza de $t_r/\Delta t)_{90\%}$, para tamanhos reduzidos de "slugs" ($L_s = 50 \text{ mm}$), parece suficiente para garantir uma mistura resultante do escoamento desprezável, quando comparada com a que resulta da acção da esteira. O mesmo já não se pode dizer, com tanta certeza, para tamanhos superiores. Contudo, recorde-se que no decorrer da análise feita no Capítulo 3, as hipóteses simplificativas foram sempre no sentido de estudar a mistura máxima possível, nomeadamente, a de escoamento laminar na película de líquido. Se se analisar novamente a Figura 3.11, conclui-se que muito provavelmente, para este diâmetro de coluna, o escoamento na película de líquido não é laminar mas sim turbulento ($Re_\delta \approx 1300$); o que como já foi referido deve conduzir a uma menor mistura, não so porque a tur

Tabela 4.1 - Razão, para a coluna de 32 mm, entre o tempo de residência do fluído na esteira e o atraso sofrido durante o escoamento nas zonas frontal e lateral (relativamente ao elemento mais rápido) por 90% dos elementos de fluído

L_s (mm)	$\approx \Delta H$ (mm) *	$\Delta t_{90\%}$ (s)	t_r (s)	$t_r / \Delta t_{90\%}$
50	30	0,028	0,457	16,3
100	75	0,042	0,457	10,9
150	120	0,070	0,457	6,5

* -A relação entre L_s e ΔH foi obtida do trabalho de Davidson e Harrison (1971)

bulência no escoamento tende a anular perfis radiais de concentração, mas também porque o perfil médio de velocidade é mais "achatado" que em escoamento laminar. Assim e pelo facto de os perfis de concentração obtidos experimentalmente não serem sensíveis ao valor de ΔH utilizado, tudo leva a crer que a mistura devida ao escoamento em torno do "slug" seja efectivamente desprezável quando comparada com a induzida pela esteira.

Como se referiu no Capítulo 3, a espessura δ da película de líquido que escorre entre o "slug" e a parede da coluna, vai diminuindo com o aumento de $-z$, até um valor limite a partir do qual se torna constante (rever Figura 3.15). Em consequência a velocidade média do líquido na referida película vai aumentando com $-z$, até atingir um valor limite. A velocidade de "mergulho" da película de líquido na esteira do "slug" vai então aumentar com o comprimento deste, até um certo valor a partir do qual passa a ser constante. É então lógico esperar que o tamanho da esteira (medido por ℓ_e) aumente inicialmente com ΔH e depois se torne constante. As experiências relatadas nas Figuras 4.13 a, b, c, mostram que a acção misturadora (e portanto ℓ_e) é independente de ΔH (na gama $30 \leq \Delta H \text{ (mm)} \leq 125$). Decidiu-se então repetir algumas experiências com $\Delta H = 10 \text{ mm}$ e os resultados na Figura 4.17 mostram que, tal como se esperava, a acção misturadora é inferior para este tamanho de "slugs". A Figura 4.18 mostra que o valor $\ell_e = 2,5 D$ traduz bem a acção misturadora de "slugs" com $\Delta H = 10 \text{ mm}$.

Após este estudo, pode-se afirmar que no caso de "slugs" em ascensão numa coluna de 32 mm de diâmetro, $Re = 6300$, a esteira não só é a grã de responsável pela mistura, como também a sua acção é bem caracterizada por uma zona de líquido perfeitamente agitada de extensão $2,8 D$, que a-

companha o "slug" na sua subida.

Em face desta conclusão, poder-se-ia pensar em duas linhas de acção de certo modo distintas. Uma linha, de maior interesse prático imediato, consistiria em repetir o estudo acima para colunas de vários diâmetros (superiores a 32 mm), com vista a determinar a dependência de l_e/D em relação ao diâmetro da coluna. Esse estudo seria possivelmente caro em equipamento (de maiores dimensões). Em alternativa, uma linha de maior interesse do ponto de vista da elucidação dos mecanismos de mistura consistiria em repetir o estudo para uma coluna de diâmetro significativamente menor. A Figura 3.28 sugere que nessa situação já a mistura induzida pelo escoamento na zona lateral deve ser significativa. Optou-se por esta linha de pesquisa que a seguir se descreve.

4.5.1.2 Experiências realizadas na coluna de diâmetro interno 19 mm

Na Figura 4.19 estão representados os perfis de concentração (c/c_0) obtidos experimentalmente após injeção de 100, 150 e 300 "slugs", de altura equivalente (ΔH), respectivamente, 30 e 60 mm. A altura total de líquido na coluna foi 2,0 m ($H_B = H_T = 1,0$ m). Comparando os perfis obtidos é evidente um maior grau de mistura para "slugs" de $\Delta H = 60$ mm, sendo esta diferença tanto mais nítida, quanto maior for o número de "slug" injectados. Analisando novamente os mecanismos de mistura, três hipóteses (conjugadas ou não) são possíveis para justificar este comportamento:

- i) A mistura provocada pela injeção do "slug" representar uma parcela importante da mistura total, aumentando com o aumento de ΔH .

ii) A mistura provocada pelo escoamento em torno do "slug" ser igualmente importante na mistura total, sendo a sua contribuição crescente com ΔH .

iii) Para "slugs" com $\Delta H = 30$ mm, a espessura da película de líquido que escorre entre a parede e o "slug", ter um valor longe do seu limite, apresentando-se ℓ_e crescente com ΔH .

Note-se que para justificar um aumento de mistura, não se pode, à partida, atribuir exclusivamente a um destes pontos esse comportamento. Assim, optou-se por determinar primeiramente os valores de ℓ_e que melhor ajustam os resultados experimentais ($\Delta H = 30$ e 60 mm) e só depois estudar as hipóteses acima mencionadas.

Na Figura 4.20 estão representados os perfis obtidos, quer experimentalmente, quer por simulação, admitindo $\alpha_T = 0,7$ e $\ell_e = 2,2 D$, para o caso de "slugs" com $\Delta H = 30$ mm (100, 150 e 300 "slugs"). A concordância entre estes perfis é muito boa e independente do número de "slugs" injectados. Refira-se que igual valor de ℓ_e se encontraria no caso de se considerar $\alpha_T = 0,6$ (no Apêndice A, $0,6 \leq \alpha_T \leq 0,7$ para a coluna de 19 mm). Na Figura 4.21 é feito o estudo da sensibilidade da mistura a uma variação do valor de ℓ_e . Os diferentes perfis traduzem a mistura provocada por esteiras com comprimentos desde 2,0 D até 2,4 D (incrementos de 0,1 D), tendo sido mantida constante a acção da injeção ($\alpha_T = 0,7$). Assim, tudo indica que a mistura provocada pela esteira de "slugs" com $\Delta H = 30$ mm seja bem caracterizada por um valor de $\ell_e = 2,2 D$, já que a acção misturadora quer da injeção, quer do escoamento na zona lateral e frontal (como adiante se verá), são pouco significativas para este tamanho de "slug".

Na Figura 4.22a, estão representados os perfis obtidos, quer experimentalmente, quer por simulação, admitindo $\alpha_T = 0,7$ e $\ell_e = 2,3 D$, para o caso de "slugs" com $\Delta H = 60$ mm (100, 150, 300 e 500 "slugs"). Contudo, como primeiro sintoma da importância da acção da injeção, se $\alpha_T = 0,6$ é necessário tomar $\ell_e = 2,4 D$ para que a concordância entre os resultados experimentais e os obtidos por simulação seja igualmente boa e independente de N (ver Figura 4.22 b). Na Figura 4.23 é feito o estudo da sensibilidade da mistura a uma variação de ℓ_e (tomando $\alpha_T = 0,7$). Este estudo para "slugs" com $\Delta H = 60$ mm parece indicar que, se não houvesse outros mecanismos a contribuir para o mistura total, o comprimento da esteira estaria entre $2,3 D$ e $2,4 D$.

Nesta altura já é possível analisar em conjunto as hipóteses anteriormente equacionadas.

Como já foi referido e se pode ver nas Figuras 4.24 a, b, a mistura provocada pela injeção faz-se sentir mais acentuadamente para "slugs" com $\Delta H = 60$ mm; na Figura 4.24 b, após a acção de 300 "slugs", a concentração (c/c_0) no topo da coluna é 0,25 se $\alpha_T = 0,7$ e 0,20 se $\alpha_T = 0,1$. Contudo, considerando os resultados já obtidos, a mistura provocada pela injeção não pode, só por si, justificar a diferença entre os perfis de concentração obtidos experimentalmente; isto porque, os valores de ℓ_e obtidos por simulação da acção da injeção e da acção da esteira são diferentes ($\ell_e = 2,2 D$ se $\Delta H = 30$ mm e $2,3 D < \ell_e < 2,4 D$ se $\Delta H = 60$ mm).

Seguindo o mesmo raciocínio que para a coluna de 32 mm, construiu-se a Tabela 4.2 onde é feita a comparação entre o tempo de residência na esteira e o atraso sofrido por 90% dos elementos no escoamento em torno do

Tabela 4.2 - Razão, para a coluna de 19 mm, entre o tempo de residência do fluído na esteira e o atraso sofrido durante o escoamento nas zonas frontal e lateral (relativamente ao elemento mais rápido) por 90% dos elementos de fluído

L_s (mm)	$\approx \Delta H$ (mm) *	$\Delta t_{90\%}$ (s)	t_r (s)	$t_r / \Delta t_{90\%}$
50	35	0,04	0,277	6,9
100	80	0,09	$\approx 0,302$	3,4
150	125	0,145	-	-

* -A relação entre L_s e ΔH foi obtida do trabalho de Davidson e Harrison (1971)

"slug". Antes porê, note-se (rever Figura 3.11) que tudo leva a crer que, para este tamanho de coluna, o regime de escoamento na película lateral seja efectivamente laminar ($Re_\delta < 800$); o que implica que a análise do Capítulo 3, embora continue a representar uma estimativa por excesso, deve estar bastante mais próxima da realidade que quando aplicada à coluna de 32 mm.

Como se pode ver na Tabela 4.2 e tendo em conta o que foi dito no parágrafo anterior, a razão $t_r/\Delta t)_{90\%}$ não é suficientemente elevada para se afirmar que a mistura no escoamento em torno do "slug" é desprezável. Contudo, a possibilidade de "slugs" com $\Delta H = 30$ mm não apresentaram estabilizada a película lateral (o que implicaria que λ_e se apresentasse como função de ΔH), não permite atribuir, sem um estudo mais profundo, toda a diferença observada na mistura ao escoamento do líquido em torno do "slug".

Para ultrapassar este problema, realizaram-se experiências com "slugs" de tamanho elevado, $\Delta H = 120$ mm. Na simulação do valor de λ_e que melhor ajusta os resultados experimentais, levantaram-se algumas dificuldades, já que a mistura provocada pela injeção é bastante acentuada (ver Figura 4.25), o que implica uma reduzida sensibilidade da mistura a uma variação de λ_e (ver Figura 4.26). Esta reduzida sensibilidade é traduzida nos diferentes valores de λ_e obtidos por simulação, conforme $\alpha_T = 0,6$ ou $\alpha_T = 0,7$ (para $\alpha_T = 0,7$ $\lambda_e = 2,5 D$ e para $\alpha_T = 0,6$ $\lambda_e = 3,1 D$ - ver Figura 4.27).

Em qualquer dos casos estes valores são superiores ao valor encontrado para "slugs" com $\Delta H = 60$ mm ($2,3D \leq \lambda_e \leq 2,4 D$). Já que para ambos os tamanhos se presume que os "slugs" se encontram estabilizados (película

la lateral com espessura mínima), a diferença entre os valores de ℓ_e só pode ser justificada pelo diferente grau de mistura durante o escoamento do líquido em torno do "slug".

Resta agora estudar a influência na mistura (e consequentemente no valor de ℓ_e), do facto de a película de líquido que escorre entre o "slug" e a parede, ainda não ter atingido as condições de queda livre estabilizada ao longo da parede. Com esse fim estudou-se experimentalmente a mistura provocada por "slugs" de tamanho reduzido, $\Delta H = 10$ mm.

Na Figura 4.28 é feita a comparação entre os perfis obtidos com "slugs" de $\Delta H = 10$ e 30 mm. Pelo facto da mistura provocada pela injeção não ser muito significativa para "slugs" com $\Delta H = 30$ mm (rever Figura 4.20) e do valor de $t_r/\Delta t)_{90\%}$ ser ainda suficientemente elevado (rever Tabela 4.2) para este tamanho de "slugs", a grande parte da diferença entre os perfis obtidos com $\Delta H = 10$ e 30 mm, tem de ser atribuída ao afastamento em relação às características limite (de queda livre) da película de líquido. Efectivamente a Figura 4.29 mostra que o valor de ℓ_e que melhor ajusta os perfis obtidos com "slugs" de $\Delta H = 10$ mm, é 1,6 D.

Este estudo na coluna de 19 mm apresenta-se, tal como inicialmente se esperava, como um campo de testes de importância dos diferentes mecanismos de mistura, sendo difícil de apresentar um valor que caracterize a acção da esteira no caso de "slugs" já estabilizados. Contudo o valor encontrado para $\Delta H = 30$ mm, situação em que tanto a mistura provocada pela injeção como a provocada pelo escoamento em torno do "slug" não se apresentam tão marcantes, $\ell_e = 2,2$ D, parece ser (possivelmente dentro de uma gama de $\pm 10\%$) o valor mais correcto para caracterizar a acção misturadora

da esteira.

4.5.2 Experiências efectuadas com injeção dos "slugs" a cadências relativamente elevadas

Em problemas práticos de mistura, a situação de maior interesse é quando a injeção de "slugs" é feita a uma cadência elevada (isto é, quando o intervalo de tempo entre a injeção de sucessivos "slugs" é curto).

O estudo da mistura que se obtém nestas condições é o objectivo desta secção. As cadências usadas foram sempre de forma a que no instante de injeção dum novo "slug", houvessem vários em ascensão no líquido. Foram utilizadas três frequências, f , nas experiências realizadas na coluna de 19 mm (altura de líquido, 2,0 m com $H_T = H_B = 1,0$ m):

- i) $f = 19/60 \text{ s}^{-1}$ encontrando-se de 4 a 5 "slugs" simultaneamente na coluna.
- ii) $f = 40/60 \text{ s}^{-1}$ encontrando-se de 8 a 9 "slugs" simultaneamente na coluna.
- iii) $f = 70/60 \text{ s}^{-1}$ encontrando-se de 14 a 15 "sglus" simultaneamente na coluna.

Na coluna de 32 mm (altura total de líquido, 2,60 m com $H_T = 1,40$ m e $H_B = 1,20$ m), realizaram-se experiências injectando "slugs" a uma cadência de $35/60 \text{ s}^{-1}$, encontrando-se então de 7 a 8 "slugs" simultaneamente na coluna.

Na Figura 4.30 a, estão representados os perfis experimentais de

concentração (c/c_0) obtidos na coluna de 19 mm, injectando "slugs" com $\Delta H = 30$ m a diferentes cadências (designou-se $f = 0/60 \text{ s}^{-1}$ a situação em que um "slug", só era injectado quando o anterior atingia o topo - experiências descritas na secção anterior). Nesta figura é evidente a diminuição do grau de mistura com o aumento da frequência de injeção, independentemente do número de "slugs". É de salientar o facto de os perfis obtidos com frequências $40/60 \text{ s}^{-1}$ e $70/60 \text{ s}^{-1}$ se apresentarem praticamente sobrepostos, o que parece indicar a existência de uma frequência limite a partir da qual se obtêm sempre o mesmo grau de mistura.

Iguais conclusões se podem tirar da Figura 4.30 b, onde estão representados os valores experimentais obtidos injectando "slugs" com $\Delta H = 60$ mm, igualmente na coluna de 19 mm.

A comparação entre os valores obtidos à frequência máxima ($f = 70/60 \text{ s}^{-1}$) injectando "slugs" com $\Delta H = 30, 60$ e 80 mm (Figuras 4.31 a, b), apresenta-se, *à priori*, surpreendente, já que os perfis, independentemente de ΔH , se apresentam praticamente coincidentes. Recorde-se que, quando injectados isoladamente, tanto a mistura provocada pelo escoamento em torno do "slug", como a provocada pela injeção, conduziram à obtenção de perfis (c/c_0) diferentes.

A primeira conclusão e talvez a mais óbvia, é que o escoamento provocado pela injeção é alterado devido à presença de "slugs" na coluna, tudo levando a crer que ele se aproxime de pistão. Este facto não é de estranhar, já que quando se encontram simultaneamente 15 "slugs" na coluna, aproximadamente 25% de todo o líquido está em escoamento turbulento nas esteiras.

O comportamento do escoamento em torno do "slug" parece mais difícil de interpretar.

O comprimento da esteira que melhor ajusta os resultados experimentais obtidos com frequência máxima (ver Figura 4.32 a), é $1,8 D$. Este valor, quando comparado com os obtidos com injeção individual, permite detectar igualmente uma alteração no comportamento de mistura da esteira. Na coluna de 32 mm, igual alteração é detectada; o valor de λ_e que melhor ajusta os resultados obtidos com frequência máxima ($35/60 \text{ s}^{-1}$) é, $\lambda_e = 2,5 D$ (ver Figura 4.32 b). Contudo para "slugs" de tamanho reduzido, $\Delta H = 10 \text{ mm}$, em ambas as colunas, não se observa esta alteração do comportamento da esteira (ver Figuras 4.33 a, b). Este facto, parece indicar que o fenómeno que provoca esta alteração, está relacionado com o escoamento do líquido na película lateral; pouco desenvolvida para "slugs" com $\Delta H = 10 \text{ mm}$.

Com o objectivo de estudar esta diminuição da acção misturadora da esteira, realizou-se, na coluna de 32 mm, o seguinte tipo de experiências:

- Injectava-se um conjunto de "slugs", tendo o cuidado de só injectar um novo "slug", no instante em que o anterior atingia uma determinada cota (sempre a mesma) na coluna. Esta cota era escolhida de forma a que ficasse situada acima e suficientemente afastada da zona de separação entre o líquido corado e não corado.

Nas Figuras 4.34 a, b, c e d, é feita a comparação entre os resultados obtidos em experiências nas quais os "slugs" eram injectados isoladamente ($\Delta H = 30, 60 \text{ e } 90 \text{ mm}$), com os obtidos em experiências como as des

critas no parágrafo anterior; foram realizadas experiências injectando o novo "slug", quer quando o anterior se encontrava a 0,45 m acima da separação dos líquidos, quer quando se encontrava a 0,90 m. Ao analisar estas figuras, é notório que a partir do ponto escolhido o transporte na esteira diminui significativamente.

Com o intuito de estudar este comportamento, considere-se um "slug" a subir isolado numa coluna de líquido (velocidade U_s - ver Figura 4.35 a). Se o "slug" for suficientemente comprido, a película lateral está perfeitamente estabilizada e a velocidade média absoluta do líquido nesta película, v_m , é dada por:

$$v_m \pi (R^2 - R_c^2) = U_s \pi R_c^2$$

ou

$$v_m = U_s \frac{R_c^2}{R^2 - R_c^2} \quad (4.25)$$

A velocidade média do líquido na película, relativamente ao "slug", será pois:

$$v_{m,s} = v_m + U_s \quad (4.26)$$

Esta velocidade é também a velocidade de "mergulho" da película lateral na base do "slug".

Interessa agora saber, como é que esta velocidade é alterada quando subitamente se injecta um novo "slug" na base da coluna. Designe-se por U_G a velocidade superficial de entrada do gás durante a injeção do

"slug". Supondo o gás incompressível, a velocidade média absoluta de subida do líquido na coluna, acima e abaixo do "slug", é igualmente U_G (por continuidade - ver Figura 4.35 b). Pelo facto de a película de líquido estar em queda livre, mesmo que a pressão (P) varie no interior do "slug", o escoamento na película não é afectado, continuando a sua velocidade média absoluta a ser v_m . Um balanço entre AA e a base da coluna (ver Figura 4.35 c) impõe:

$$U_b^* \pi R_c^2 = U_G \pi R^2 \quad (4.27)$$

em que U_b^* é a velocidade da base do "slug" durante a injeção. A velocidade relativa de "mergulho" da película lateral na base do "slug", durante o processo de injeção ($v_{m,s}^*$) será:

$$v_{m,s}^* = v_m + U_G \frac{R^2}{R_c^2} \quad (4.28)$$

Como $R/R_c \approx 1$, comparando as equações (4.26) e (4.28), conclui-se que se $U_G > U_s$ a velocidade relativa de "mergulho" da película na base do "slug" é maior durante o período de uma nova injeção do que quando a ascensão não é perturbada. Uma estimativa de U_s e U_G para um "slug" ($\Delta H = 60$ mm) numa coluna de 19 mm, tomando 0,3 s como o tempo de injeção (ver secção 4.4), mostra efectivamente que U_G (200 mm/s) $>$ U_s (151 mm/s); note-se que U_G foi calculado considerando esta velocidade constante durante o período de injeção, o que não é totalmente verdade.

A maior velocidade relativa de "mergulho" da película durante a

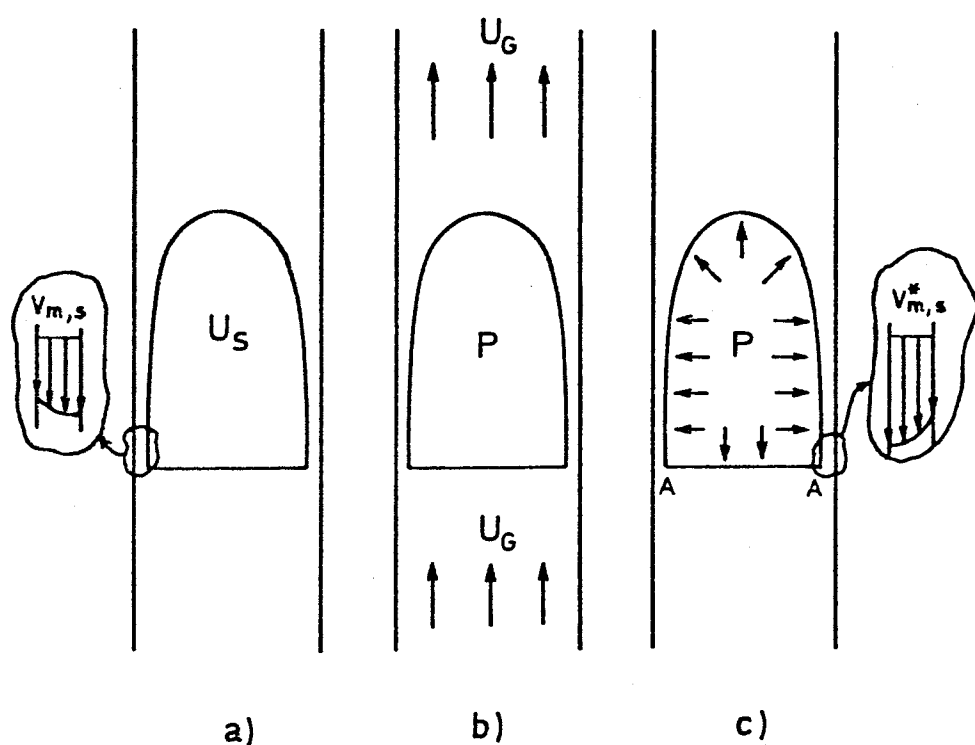


Figura 4.35 - a) Esquema da velocidade relativa de mergulho da película lateral na base de um "slug" a subir isolado na coluna, $v_{m,s}$; b) Esquema da velocidade média absoluta de subida do líquido na coluna durante a injeção de um novo "slug"; c) Esquema da velocidade relativa de mergulho da película lateral na base de um "slug" durante a injeção de um novo "slug", $v_{m,s}^*$.

injecção, implica um aumento de caudal (tanto de entrada como de saída) de líquido na esteira. Esta alteração dos caudais leva a que grande parte do líquido (se não todo) que se encontrava na esteira no início da injecção, se desprenda do "slug" sem que haja mistura perfeita com o líquido que está a passar nesse instante na base do "slug".

A Figura 5.5q (fotografias obtidas com líquidos viscosos que serão analisadas no Capítulo 5) mostra um instantâneo obtido durante a ascensão dum "slug" num líquido viscoso (esteira em escoamento laminar), poucos instantes após a introdução na base da coluna de um novo "slug". A mancha escura que se vê na fotografia, corresponde ao líquido que se desprende do "slug" no instante da introdução do novo "slug". Se para "slugs" em água se verificar igual comportamento (difícil de documentar fotograficamente, já que a esteira é turbulenta), fica justificada a diminuição de mistura observada nas experiências com injecção cadenciada.

Devido a esta alteração na esteira, o valor de λ_e obtido na simulação da mistura deixa de ter o significado que inicialmente lhe era atribuído; comprimento da zona de mistura. Passa, por um lado, a representar o comprimento que a esteira teria que ter para, no caso de não ser perturbada, produzir a mistura obtida experimentalmente e por outro, a medir o "atraso" provocado na mistura pela injecção cadenciada de "slugs" (0,3 D na coluna de 32 mm e 0,4 D na coluna de 19 mm).

Finalmente e para dar uma medida da dificuldade em homogeneizar a água pela passagem de "slugs", traçou-se a Figura 4.36 ($D = 19$ mm e $f = 70/60$ s⁻¹). Nesta figura vê-se que é necessário injectar 2250 "slugs", para que não haja nenhuma secção de líquido com concentração superior ou

inferior em 5% à concentração de mistura total ($c/c_0 = 0,5$ já que se partiu de alturas iguais de solução corada e não corada).

4.6 Análise dos resultados experimentais com base na equação de difusão (dispersão longitudinal)

A mistura longitudinal em colunas de borbulhamento em contínuo é frequentemente caracterizada por um parâmetro D_L , coeficiente de dispersão longitudinal, que utilizado nas leis de difusão, traduz a dispersão de soluto observada.

Para uma coluna com distribuição inicial de concentração de soluto idêntica à usada nas experiências descritas, se se borbulhasse ar em contínuo, poder-se-ia pensar em descrever a dispersão do soluto pela 2.^a lei de Fick:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (4.29)$$

A solução desta equação adequada ao problema tem que satisfazer as seguintes condições de contorno:

$$t = 0 \quad c = c_0 \quad -H_B < z < 0$$

$$t = 0 \quad c = 0 \quad 0 < z < H_T$$

$$t > 0 \quad \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad z = -H_B \text{ e } z = H_T$$

em que a última condição traduz a impermeabilidade de base e do topo à passagem de soluto.

A solução procurada - Carslaw e Jaeger (1959) - é:

$$\frac{c}{c_o} = \frac{H_B}{H_B + H_T} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cdot \text{sen} \left(\frac{n \pi H_B}{H_B + H_T} \right) \cdot \exp \left[\frac{-D_L t n^2 \pi^2}{(H_B + H_T)^2} \right] \cdot \cos \left[\frac{n \pi (H_B + z)}{H_B + H_T} \right] \quad (4.30)$$

Parando o borbulhamento ao fim dum tempo t após o início, a comparação do perfil de concentração experimental então observado, com o teórico dado pela equação (4.30), permitirá seleccionar o D_L que melhor ajusta os dados experimentais. Contudo, no caso das experiências realizadas e descritas na secção anterior, não se trata de borbulhamento contínuo, mas sim da injeção de um número N de "slugs" de igual tamanho. Como a acção misturadora é resultante da passagem de cada "slug", é o número de "slugs" injectados na coluna e não é o tempo da experiência, que determina o grau de mistura. Assim 50 "slugs", por exemplo, injectados em 5 min. ou em 10 min. deverão dar o mesmo perfil final de concentração. O ajuste da equação (4.30) aos dados experimentais (perfil de concentração ao fim da passagem de N "slugs") pode na mesma ser feito, mas agora determinado o valor de $(D_L t)$ que melhor traduz o perfil de concentração observado.

Com o valor de $(D_L t)$ para N "slugs" pode então determinar-se a razão $(D_L t)_i = (D_L t)/N$ que mede a acção dispersante imputável a cada "slug".

Será de esperar que o valor de $(D_L t)_i$ seja sensivelmente independente do número de "slugs" utilizados nas experiências e com razoável aproximação é o que é demonstrado nas Figuras 4.37 a, b, respectivamente para as colunas de 19 e 32 mm.

Nestas figuras pode ver-se que para a coluna de 32 mm, desde que $\Delta H \geq 30$ mm, $(D_L t)_i \approx 39 \times 10^2 \text{ mm}^2$ enquanto que para a de 19 mm, $9 \times 10^2 \leq (D_L t)_i (\text{mm}^2) \leq 12 \times 10^2$ para $30 \leq \Delta H (\text{mm}) \leq 60$.

No ajuste da equação (4.30) aos dados experimentais utilizou-se o método dos mínimos quadrados:

$$\frac{\partial}{\partial (D_L t)} \sum_{n=1}^J [(c/c_o) - (c/c_o)_{\text{exp}}]^2 = 0 \quad (4.31)$$

em que J representa o numero de pontos experimentais conhecidos.

Na Figura 4.38 é apresentado, como exemplo, um resultado deste ajuste.

A vantagem desta abordagem será, eventualmente, a de permitir determinar valores de $(D_L t)_i$ para "slugs" em tubos, em função das propriedades do sistema, através das experiências como as descritas neste capítulo. Com este conhecimento de base, num caso de borbulhamento contínuo de "slugs" de características bem determinadas, se for conhecida a frequência $f(\text{s}^{-1})$ de passagem de "slugs", o coeficiente de dispersão pode ser calculado através de $D_L = (D_L t)_i \cdot f$.

A esperança de porventura se proporcionarem situações reais em que

este tipo de abordagem seja possível, é remota. Contudo a elucidação dos mecanismos de mistura que este tipo de estudo proporciona, parece vantajosa.

4.7 Conclusões

A conclusão mais relevante deste capítulo, é a confirmação da hipótese de caracterização da mistura provocada pela esteira de um "slug" em ascensão numa coluna de água, através da comparação da sua acção, com a de um "tanque" perfeitamente agitado em ascensão na coluna "preso" ao "slug". Esta possibilidade de caracterização é tanto maior, quanto maior for o diâmetro da coluna onde o "slug" sobe.

Concretamente foi demonstrado que numa coluna de 32 mm ($Re = 6300$) a acção misturadora da esteira é, desde que $\Delta H \geq 30$ mm, equivalente à de um tanque perfeitamente agitado de altura $2,8 D$ (≈ 90 mm).

Para uma coluna de 19 mm ($Re = 2900$), foram salientadas as dificuldades de isolar a acção misturadora da esteira, da acção da injeção e do escoamento em torno do "slug", tendo apesar de tudo sido demonstrado, com uma margem de erro de $\pm 10\%$, que para "slugs" com $\Delta H \geq 30$ mm a sua acção é equivalente à de um "tanque" perfeitamente agitado com uma altura $2,2 D$ (42 mm).

Foi igualmente estudada a mistura provocada pela injeção cadencia da de "slugs" numa coluna de água. A comparação dos resultados experimentais obtidos nestas condições, com os obtidos em experiências semelhantes mas com injeção isolada, evidenciou uma alteração na acção misturadora da esteira. Esta alteração de comportamento foi justificada com base em observações colhidas durante o estudo fotográfico que será descrito no Capítulo 5, as quais foram completadas com uma análise aproximada do comportamento da coluna (incluindo os "slugs") no instante da injeção do novo "slug". Esta alteração foi quantificada em termos do comprimento da esteira, tanto

para a coluna de 19 mm, como para a de 32 mm de diâmetro; na de 19 mm esta alteração provoca uma diminuição de 18% na mistura induzida pela esteira enquanto que na 32 mm provoca uma diminuição de 11%.

Foi também posta em evidência a dificuldade de homogeneizar uma coluna de água, com uma distribuição inicial de soluto em "degrau", através da passagem de "slugs".

Finalmente os resultados experimentais foram analisados com base na equação de difusão. Foram calculados valores do parâmetro $(D_L t)_i$, em que D_L representa o coeficiente de dispersão longitudinal, que quantificam a mistura induzida pela passagem de "slugs" em colunas de água; para a coluna de 32 mm, $(D_L t)_i \approx 39 \times 10^2 \text{ mm}^2$ desde que $\Delta H \geq 30 \text{ mm}$, enquanto que para a de 19 mm, $9 \times 10^2 \leq (D_L t)_i \text{ (mm}^2) \leq 12 \times 10^2$ para $30 \leq \Delta H \text{ (mm)} \leq 60$. Foi ainda posta em evidência a utilidade desta análise no estudo da mistura longitudinal em borbulhamentos contínuos de "slugs" de características bem definidas.

CAPÍTULO 5

Caracterização da esteira de
"slugs" em líquidos viscosos
e sua acção misturadora

5.1 Introdução

Como foi exposto no capítulo anterior, o principal agente da mistura longitudinal provocada pela passagem de um "slug" numa coluna de água, é a esteira turbulenta que acompanha o "slug" na sua subida. Contudo, como foi referido, a mistura resultante da passagem de um só "slug" em água é pouco acentuada, sendo necessário estudar o efeito da passagem de um número elevado de "slugs" para se conhecer o parâmetro λ_e que caracteriza a acção individual.

Quando se aumenta a viscosidade do líquido, os mecanismos responsáveis pela mistura (rever Capítulo 2) são diferentes dos estudados para o caso da água. Durante a realização de experiências, em condições experimentais exactamente iguais às utilizadas no Capítulo 4 (H_B , H_T , D , ΔH e N), constatou-se a "olho nú" este diferente comportamento:

- Após a passagem de um "slug" em vez de se notar, logo acima da zona de separação inicial dos líquidos corado e não corado ($z = 0$), uma zona de coloração tênue e uniforme como no caso da água (ver Figura 5.1a), notava-se (para $z > 0$) um rasto de cor ao longo do eixo da coluna e um depósito de solução corada no topo da coluna (ver Figura 5.1b). Após a passagem de vários "slugs" esta distribuição ia-se acentuando, notando-se acima da separação inicial uma zona de líquido incolor (excepto perto do eixo da coluna), seguida de uma zona de forte coloração (ver Figura 5.1c).

Este tipo de distribuição mostra que a mistura radial em líquidos viscosos é muito pouco acentuada (contrariamente ao caso da água), isto é, da passagem de um "slug" não resulta uma boa micro-mistura entre as diferentes porções de líquido que vão ficar situadas numa dada secção recta da

coluna.

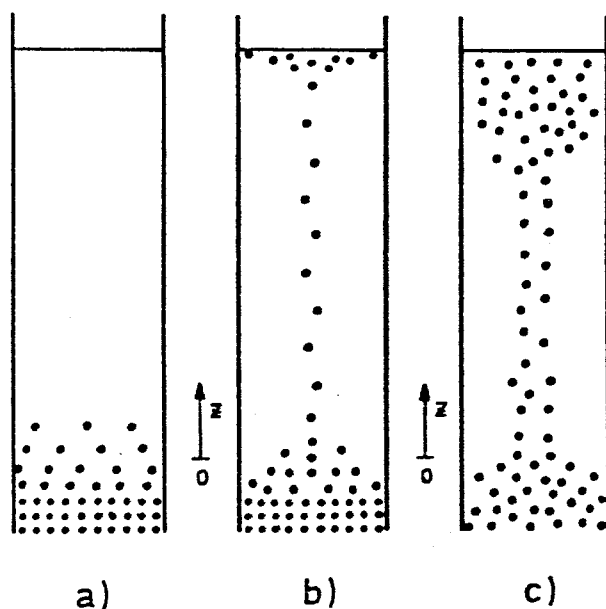


Figura 5.1 - a) Distribuição de corante após passagem de um "slug" numa coluna de água; b) Distribuição após passagem de um "slug" numa coluna de líquido viscoso; c) Distribuição após passagem de vários "slugs" numa coluna de um líquido viscoso.

Analise-se de seguida a Figura 5.2 onde estão representados os perfis de concentração obtidos após injeção de 15, 25, 40 e 50 "slugs" de $\Delta H = 60$ mm, num líquido com $\nu = 50 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (está igualmente representado o perfil obtido quando se injectam em água 50 "slugs" de $\Delta H = 60$ mm). Note-se que nestes perfis c representa a concentração que se obtém quando, depois da amostragem, se homogeniza todo o líquido contido entre duas válvulas (isto é, duas secções rectas).

Em qualquer dos perfis obtidos com $v = 50 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, verifica-se um acréscimo de concentração no topo da coluna ($z = 1,0 \text{ m}$), resultante do depósito (já citado) de líquido corado. Comparando os perfis obtidos, após injeção de 50 "slugs", para a água e para a solução com $v = 50 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, nota-se uma mistura muito maior no líquido viscoso, inclusivamente superior à obtida após injeção de 500 "slugs" em água (ver Figura 4.22).

Durante a realização destas experiências, pela simples observação a "olho nũ" da ascensão do "slug" no líquido (para $z > 0$), detectou-se a presença de uma esteira de características totalmente diferentes da de um "slug" em água, contorno bem definido e recirculação interna de líquido regular (ver Figura 5.16, onde estão representadas fotografias de esteiras de "slugs" em líquidos viscosos obtidas com uma técnica fotográfica que será descrita na secção 5.3). Foi igualmente observado que a esteira era responsável pelo depósito de líquido corado observado no topo da coluna. A esteira durante a subida no líquido incolor não perdia todo o líquido corado com que tinha atravessado o plano $z = 0$ e após o "slug" rebentar no topo da coluna, o líquido corado que ainda permanecia na esteira era aí depositado. Este comportamento denotava uma relativa "impermeabilidade" da esteira à entrada do fluído que estava em escoamento à sua volta, facto que encorajou o estudo isolado da acção misturadora da esteira de "slugs" em líquidos viscosos (esteira laminar que passará a ser designada por esteira "fechada").

Uma primeira parte deste estudo consistiu na determinação, através de uma técnica fotográfica, do volume da esteira (V_e) em função de

$Re (= \frac{U_s D}{\nu})$ e do tamanho do "slug" (ΔH).

Numa segunda parte estudou-se, também através de uma técnica fotográfica, a estrutura interna da esteira, em particular as trajectórias de circulação do líquido (igualmente em função de Re).

Uma terceira parte consistiu na quantificação da permuta de líquido entre a esteira em ascensão e o líquido em escoamento à sua volta, também em função de Re e ΔH .

Nas secções seguintes é feita a descrição, quer das técnicas experimentais utilizadas, quer dos resultados obtidos.

5.2 Determinação do volume da esteira de "slugs" em líquidos viscosos

Pretendeu-se com este estudo determinar o volume da esteira de um "slug" em ascensão num líquido viscoso.

Com este fim, utilizou-se uma coluna com líquido corado desde $z = -H_B$ até $z = 0$ e líquido incolor desde $z = 0$ até $z = H_T$. A esteira, depois de passar no plano de separação ($z = 0$) e devido à sua estrutura fechada, retinha no seu interior líquido corado, o qual proporcionava através do contraste com o líquido incolor que estava em escoamento à sua volta, uma definição nítida da fronteira da esteira. Para captar esta imagem, optou-se por tirar (com a máquina fotográfica parada) instantâneos (fotografias com reduzido tempo de exposição) do "slug" e respectiva esteira em ascensão no líquido incolor.

5.2.1 Descrição da instalação experimental

A secção de teste utilizada neste estudo fotográfico está esquematizada na Figura 5.3. Dela faziam parte, nomeadamente:

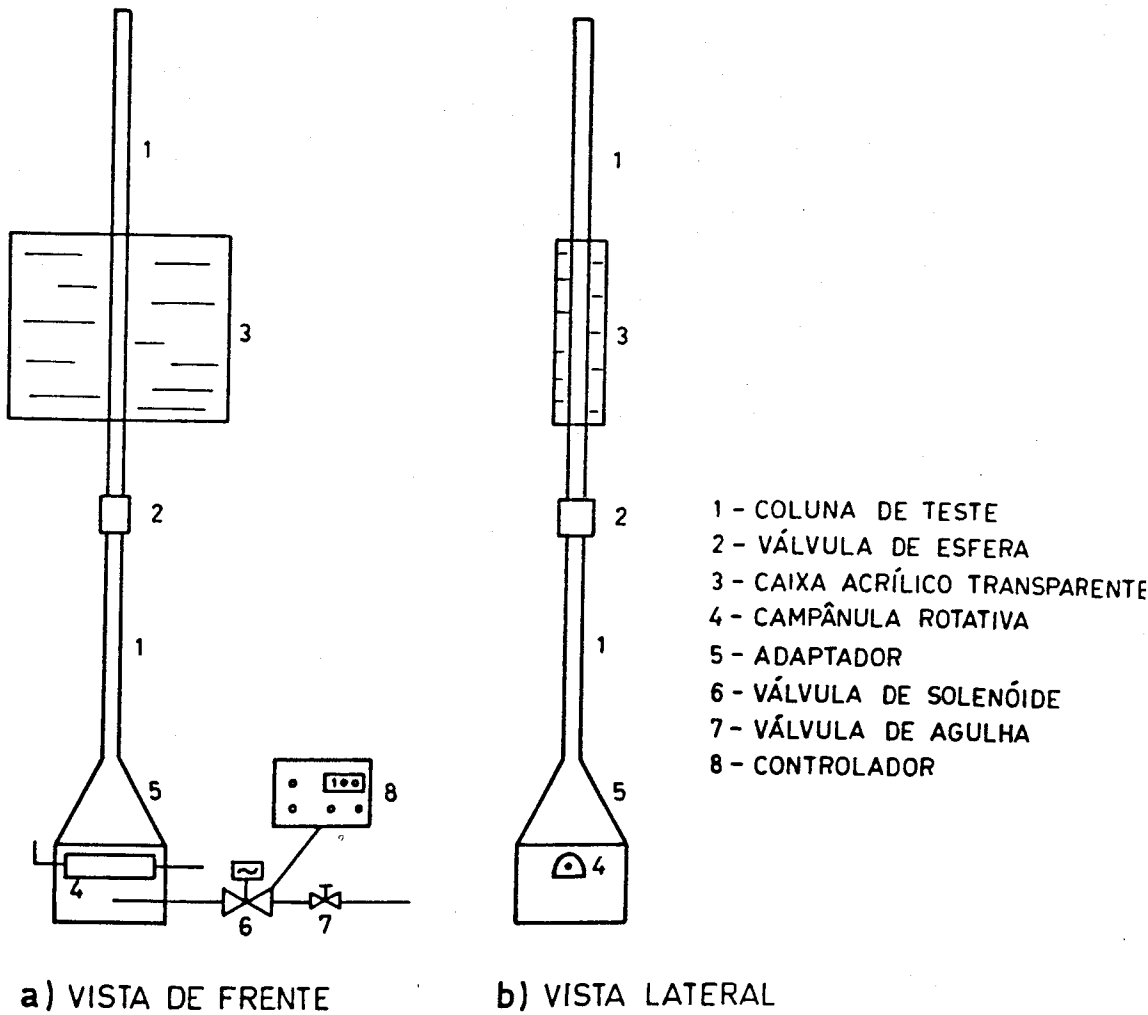


Figura 5.3 - Representação esquemática da instalação experimental:
 a) vista de frente; b) vista lateral.

I) Duas secções de tubo (1) em vidro acrílico transparente, separadas por uma válvula de esfera (2) de diâmetro interno igual ao do tubo (foram realizadas experiências somente em colunas com 19 mm de diâmetro interno).

II) Uma caixa paralelepipedica de vidro acrílico (3) cheia com água e atravessada da base ao topo pela coluna.

Esta caixa permitia atenuar a distorção da imagem provocada pela refração da luz de iluminação na superfície curva da coluna. É de notar que os índices de refração da água e do vidro acrílico são muito semelhantes.

Esta caixa enquadrava a zona da coluna em que era fotografada a esteira.

III) Um sistema de injeção de "slugs" idêntico ao utilizado no estudo da mistura provocada por "slugs" em água (Capítulo 4 - Figura 4.8). Houve porém algumas alterações. Logo acima do injector colocou-se uma campânula oca (4) com a forma de um meio cilindro atravessada de topo a topo por um eixo, através do qual era possível rodar a campânula do exterior da coluna. Esta campânula permitia a coalescência do ar injectado para a formação de cada "slug" (notou-se que se houvesse pequenas bolhas de ar na esteira do "slug" a sua estrutura podia ser alterada). Na posição 1 (ver Figura 5.4), a campânula captava todo o ar injectado, o qual, quando se rodava a campânula para a posição 2, era libertado e subia na coluna.

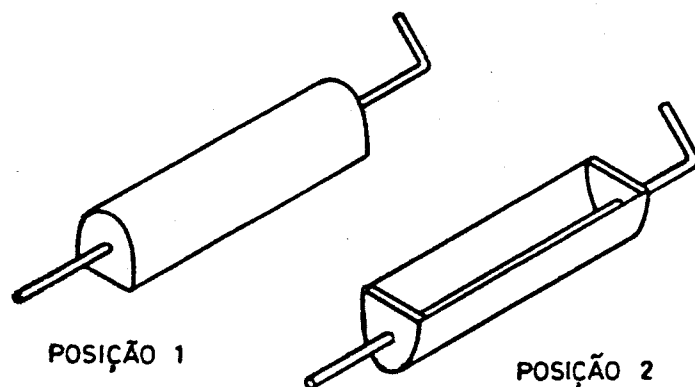


Figura 5.4 - Campânula utilizada para formação dos "slugs".

As elevadas dimensões desta campânula (projectada de modo a reter "slugs" com $\Delta H \leq 200$ mm) obrigaram a algumas alterações na base da coluna. Assim, construiu-se uma secção de vidro acrílico de diâmetro (70 mm) superior ao da coluna, de forma a acomodar a campânula e o injectador de ar. A união entre esta secção e a coluna era feita por meio de um adaptador em aço inoxidável de forma tronco-cônica (5).

O equipamento utilizado no estudo fotográfico foi:

1) Uma máquina fotográfica Nikon F.M.. Foram feitos estudos preliminares de modo a obter um compromisso entre a intensidade de iluminação, o tempo de abertura do diafragma e as características de impressão da película. Este compromisso foi obtido com película fotográfica 100-125 ASA (preto e branco) e um tempo de abertura de 1/500 s.

11) Seis lâmpadas (tipo projector) de 100 Watts cada. Quatro iluminavam directamente a zona de teste, enquanto as outras duas, colocadas lateralmente, uma de cada lado, iluminavam o fundo branco colocado no lado apostado à máquina fotográfica. Este fundo, constituído por papel de veludo branco, tinha como objectivo provocar uma "reflexão difusa" da luz. A secção de teste encontrava-se protegida da luz directa das duas lâmpadas colocadas lateralmente por intermédio de chapas de alumínio.

Um anteparo em papel preto apenas com um orifício, para captação da imagem, foi colocado em torno da máquina de forma a atenuar a incidência de luz difusa sobre a lente.

Para se conhecerem com rigor as dimensões reais do objecto fotografado, colaram-se na face anterior da caixa paralelepipedica, perto da zona em que se pretendia obter a fotografia, duas escalas de papel milimétrico, uma vertical e outra horizontal. Na face posterior colaram-se outras duas escalas, que permitiam ter uma medida da distorção da imagem resultante do feixe incidente na objectiva não ser exactamente paralelo.

5.2.2 Descrição do modo de operação

Na realização das experiências o procedimento adoptado era o seguinte:

1) Enchia-se gradualmente, pelo topo, a coluna com solução (água e glicerina nas proporções pretendidas) fortemente corada, até um nível imediatamente acima da válvula de esfera.

II) Depois de fechar a válvula de esfera e limpar a coluna acima desta, enchia-se parcialmente (cerca de 0,5 m de altura) a parte superior da coluna com igual solução mas sem corante.

III) Abria-se então a válvula de esfera e injectava-se na base da coluna um "slug" de características previamente definidas, ficando este retido na campânula o tempo considerado necessário para haver uma coalescência total do ar.

IV) Rodava-se a campânula e o "slug" subia na coluna. No momento em que passava na secção enquadrada pelas escalas coladas na caixa paralelipipédica (0,2 a 0,3 m acima da válvula de separação), tirava-se a fotografia.

V) Retirava-se do meio da coluna uma amostra de líquido e media-se a sua temperatura. No início, quando as soluções eram introduzidas na coluna, encontravam-se à temperatura ambiente. Note-se que só se consideravam com significado, fotografias que tivessem sido tiradas sem que a temperatura da solução tivesse tido uma elevação (entre o início e o fim da experiência) superior a $0,3^{\circ}\text{C}$ (valor arbitrariamente considerado como limite para uma variação reduzida da viscosidade da solução).

Um cuidado que se teve, para evitar o aquecimento do líquido, foi manter as lâmpadas acesas por um período de tempo curto, apenas o necessário para se obter a fotografia.

VI) Caso se estivesse interessado em estudar a influência do tamanho do "slug" no volume da esteira, retirava-se todo o líquido da secção superior e repetia-se o procedimento anterior (desde II) agora com um "slug" de tamanho diferente.

VII) Após cada conjunto de experiências, determinava-se a viscosidade cinemática da solução à temperatura de operação, usando para o efeito um viscosímetro (tipo Cannon-Fenske) mergulhado num banho termostático de elevada precisão ($\pm 0,05^{\circ}\text{C}$).

5.2.3 Apresentação de algumas das fotografias obtidas

As Figuras 5.5 (a-q) mostram, à escala aproximada de 1:1, algumas das fotografias obtidas. Cada fotografia (a-p) é elucidativa de uma situação experimental bem definida (Re e ΔH conhecidos); escolheram-se, de entre todas as obtidas, para cada Re , duas fotografias representativas de diferentes valores de ΔH .

A fotografia 5.5q é elucidativa dum comportamento que foi observado no decorrer deste estudo fotográfico e que além de ser curioso, pode servir de ponto de partida para novos estudos. A esteira, que tem sido descrita até agora como uma identidade "presa" ao "slug", pode desprender-se totalmente da sua base. Este desprendimento foi conseguido provocando uma alteração brusca nos campos de velocidade e pressão do líquido em escoamento em torno da esteira. Esta alteração foi provocada pela injeção de um novo "slug" na base da coluna. Refira-se que foi esta observação ,

documentada na fotografia 5.5q, que possibilitou a interpretação dos resultados obtidos quando se estudou a injeção cadenciada de "slugs" em água (ver 4.5.2).

Analisando as fotografias (a-p) é evidente mesmo à vista desarmada, um aumento do volume da esteira com um aumento de Re . Para $Re = 30$ (5.5 a,b) o volume da esteira é muito reduzido, inclusive impossível de quantificar com precisão. Para $Re = 264$ (5.5 o,p) o volume é visivelmente superior a qualquer outro. Esta variação do tamanho da esteira com Re era esperada, pois igual variação é verificada no escoamento de um líquido viscoso em torno de um cilindro colocado num meio infinito - ver Schlichting (1966). Interessa agora quantificar a variação de V_e com Re e estudar a influência de ΔH nesta relação.

5.2.4 Método de análise das fotografias para obtenção dos volumes da esteira e do "slug"

As fotografias após reveladas eram ampliadas de modo às imagens terem aproximadamente um tamanho duplo do real. O valor exacto do factor da ampliação era determinado comparando as dimensões reais das escalas horizontais e verticais, 30 mm nas escalas verticais e 20 mm nas horizontais, com as medidas em cada fotografia. É de notar que o desvio relativo entre os comprimentos medidos quer nas escalas verticais, quer nas horizontais (coladas em ambas as faces da caixa paralelepipedica) nunca foi superior a 4%. Este valor traduz uma reduzida distorção da imagem provocada por paralaxe. A partir de cada fotografia determinava-se o volume do "slug" e

da esteira do seguinte modo:

I) Colocava-se uma folha de papel milimétrico transparente sobre a fotografia.

II) Determinava-se o ponto médio da base (geralmente horizontal) do "slug", o qual era tomado como origem das coordenadas.

III) Traçava-se a recta (eixo da coluna) que passava por esta origem e era paralela à superfície lateral da coluna (note-se que em todas as fotografias são nítidos os traços referentes à superfície lateral da coluna).

IV) Liam-se, tanto à direita como à esquerda desta recta as coordenadas r e z , do maior número possível de pontos do contorno das superfícies do "slug" e da esteira. O erro máximo de leitura de cada coordenada não deve exceder $\pm 0,5$ mm o que para um factor de ampliação 2, corresponde a um erro real de $\pm 0,25$ mm.

V) Para cada conjunto de três pontos consecutivos da esteira, situados (na fotografia) à direita do eixo, ajustava-se numericamente um polinômio do 2º grau:

$$r(z) = a_1 z^2 + a_2 z + a_3$$

em que a_1 , a_2 e a_3 são constantes.

Procedia-se de igual modo para o "slug"

VI) Calculavam-se os volumes dos sólidos de revolução gerados pela rotação, em torno do eixo, dos polinômios ajustados, sendo o volume da esteira dado por:

$$V_e = \int_{z_1}^{z_3} \pi [r^2(z)]_{1,3} dz + \int_{z_3}^{z_5} \pi [r^2(z)]_{3,5} dz + \dots$$

$$..+ \int_{z_{n-2}}^z \pi [r^2(z)]_{n-2,n} dz$$

em que n representa o número de pontos da superfície da esteira lidos à direita do eixo e $[r(z)]_{n-2,n}$ o polinômio ajustado entre os pontos (n-2) n.

Procedia-se de igual modo para o "slug".

VII) Repetiam-se os procedimentos V e VI para os pontos situados à esquerda do eixo.

VIII) Comparavam-se os valores obtidos para cada um dos lados (quer para a esteira quer para o "slug") considerando-se aceitável a média dos resultados que não apresentassem entre si desvios relativos superiores a 5% (i.e "slugs" e esteiras praticamente simétricos em relação ao eixo da coluna).

Da análise da sensibilidade dos volumes da esteira e do "slug" ao

erro cometido na leitura de cada coordenada ($\pm 0,25$ mm), é de esperar um erro percentual máximo de $\pm 2\%$ nos valores de V_e e V_s determinados por este método.

5.2.5 Apresentação e discussão dos valores encontrados para o volume da esteira

Na Figura 5.6 estão representados os valores do volume da esteira (V_e) em função de ΔH para alguns valores de Re .

Os resultados experimentais mostram que para cada Re existe um valor crítico de ΔH , ao qual chamaremos ΔH_c ; "slugs" com $\Delta H > \Delta H_c$ têm todos o mesmo volume de esteira (V_{ec}) enquanto que para "slugs" com $\Delta H < \Delta H_c$ verifica-se que V_e diminui com ΔH . Por exemplo, para $Re = 72$ $\Delta H_c \approx 14$ mm e se $\Delta H > \Delta H_c$, V_{ec} é sempre $1,16 \text{ cm}^3$.

Na Figura 5.7 estão representados os volumes (V_{ec}) das esteiras ($\Delta H > \Delta H_c$) em função de Re . A relação:

$$V_{ec} (\text{cm}^3) = 1,47 \times 10^{-2} Re \quad (5.1)$$

representa bem os dados experimentais.

A existência de valores críticos ΔH_c acima dos quais, para Re constante, as características da esteira não são afectadas por aumentos de ΔH não é surpreendente. Quando um "slug" sobe na coluna, o líquido compreendido entre a superfície lateral do "slug" e a parede do tubo escorre apenas sob a acção da gravidade (já que a pressão no interior do "slug" é

constante) e ao fim de uma distância suficientemente grande abaixo da zona frontal do "slug" (para ΔH suficientemente elevado) o perfil de velocidade na película anelar estabiliza, isto é, não há variações de velocidade com z . Este aspecto foi estudado no Capítulo 3 e está representado esquematicamente na Figura 5.8. O perfil de velocidade na película, velocidades relativas ao "slug", é o mesmo qualquer que seja a posição abaixo

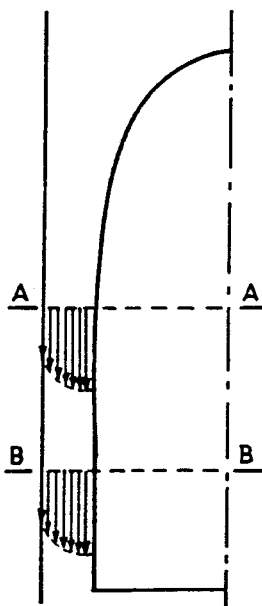


Figura 5.8 - Perfis de velocidade na zona da película lateral de espessura constante (δ_c).

xo do plano AA e como tal desde que o plano BB da base do "slug" esteja abaixo de AA a esteira tem sempre as mesmas características. No caso de BB estar acima da cota a que estabilizaria o perfil de velocidade no filme anelar, o perfil de velocidade no líquido à entrada da esteira passa a ser dependente de ΔH e por conseguinte as características da esteira passam também a ser dependentes de ΔH .

Um teste a esta ideia pode ser feito se se recordar (Capítulo 3) que é possível obter uma estimativa teórica aproximada do comprimento crítico do "slug", L_{sc} , a partir do qual a película anelar em torno do "slug" estabiliza. A equação (3.26) fornece essa estimativa e para a coluna de 19 mm, os valores de L_{sc} correspondentes aos vários números de Reynolds estão representados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Valores teóricos de L_{sc} em função de Re numa coluna de 19 mm

L_{sc} (mm)	14.2	15.5	20.3	25.6	27.7	28.2	36.2
Re	60	72	114	153	169	179	264

Podem-se agora representar os valores experimentais de V_e em função de L_s (obtidos das fotografias) para cada Re (Figura 5.9) e tal como na representação da Figura 5.6, observa-se que para cada Re existe um valor de L_s a partir do qual V_e estabiliza. No gráfico da Figura 5.9 representaram-se igualmente, por C, os valores teóricos aproximados de L_{sc} apresentados na Tabela 5.1 e como se pode ver eles parecem delimitar bem (em especial para $Re > 114$) as zonas em que V_e tende para um valor constante.

O estudo fotográfico de "slugs" em ascensão em líquidos de várias viscosidades, embora realizado prioritariamente para permitir a caracterização das esteiras, permitiu também uma verificação de algumas ideias expostas no Capítulo 3. Nomeadamente, foi possível determinar de modo indi-

recto valores da espessura crítica da película anelar como se passa a descrever.

Considerem-se "slugs" de comprimento L_{s1} e L_{s2} , superiores a L_{sc} . Se forem V_1 e V_2 os respectivos volumes sabe-se (ver Figura 5.10) que $V_2 - V_1 = (L_{s2} - L_{s1})\pi R_c^2$.

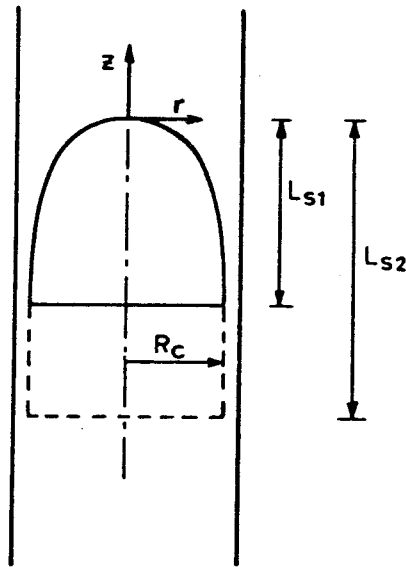


Figura 5.10 - Representação esquemática da variação de V_s com L_s em "slugs" suficientemente compridos ($L_s > L_{sc}$).

Como $R_c = R - \delta_c$ e $V_s = \pi R^2 \Delta H$, pode deduzir-se na forma diferencial a expressão:

$$\frac{d L_s}{d(\Delta H)} = (1 - 4 \delta_c / D)^{-1} \quad (5.2)$$

válida para "slugs" com comprimento $L_s > L_{sc}$. Do estudo fotográfico pode obter-se os valores de L_s em função de ΔH para cada viscosidade de líquido, isto é, para cada valor Re . Na Figura 5.11 estão representados os valores de L_s e ΔH obtidos na análise das fotografias. Como se pode ver a variação de L_s com ΔH é efectivamente linear. As equações que traduzem esta variação, obtidas por regressão linear, são nomeadamente:

$$\begin{array}{ll}
 L_s = 5,97 + 1,612 \Delta H & Re = 60 \\
 L_s = 3,54 + 1,613 \Delta H & Re = 72 \\
 L_s = 6,18 + 1,450 \Delta H & Re = 114 \\
 L_s = 6,57 + 1,419 \Delta H & Re = 153 \\
 L_s = 4,32 + 1,400 \Delta H & Re = 169 \\
 L_s = 6,78 + 1,413 \Delta H & Re = 179 \\
 L_s = 4,84 + 1,417 \Delta H & Re = 264
 \end{array} \tag{5.3}$$

com L_s e ΔH expressos em (mm).

Derivando cada uma destas equações em ordem a ΔH e substituindo o valor da derivada na equação (5.2), obtêm-se os valores experimentais de δ_c ($\delta_{c,exp.}$). Estes valores encontram-se na Tabela 5.2 onde estão também representados os valores teóricos (δ_c) obtidos da equação (3.21).

O desvio relativo entre δ_c e $\delta_{c,exp}$ é sempre inferior a $\pm 10\%$. Esta concordância vem confirmar algumas das hipóteses postas no Capítulo 3, nomeadamente a de escoamento laminar na película anelar do líquido.

Tabela 5.2 - Valores teóricos e experimentais de δ_c (D = 19 mm)

Re	δ_c (mm)	$\delta_{c,exp}$ (mm)	$\frac{\delta_c - \delta_{c,exp}}{\delta_c} \times 100$	Re_{δ_c}
60	1,93	1,80	7%	9
72	1,85	1,81	2%	12
114	1,62	1,48	9%	20
153	1,50	1,40	7%	29
169	1,47	1,36	8%	33
179	1,43	1,39	3%	34
264	1,27	1,40	-10%	53

5.2.6 Generalização dos valores encontrados para o volume da esteira numa coluna de 19 mm

Obtida uma relação entre V_{ec} e Re (equação 5.1) para a coluna de 19 mm, é do maior interesse prático generalizá-la, isto é, torná-la independente do diâmetro da coluna. Com este objectivo recorreu-se à teoria da análise dimensional.

Como se tem vindo a pôr em destaque, o tamanho da esteira, L_e , depende da velocidade média da película de líquido que atinge a base do "slug" (plano de entrada na zona da esteira) e por conseguinte da espessura δ da película anelar:

$$L_e = f(\delta) \quad (5.4)$$

Como já foi referido δ torna-se independente de z para valores de $-z$ suficientemente elevados. Será de esperar que δ dependa das propriedades físicas do líquido (μ, ρ), da aceleração da gravidade (g), do diâmetro D da coluna e do comprimento L_s do "slug" enquanto for $L_s < L_{sc}$. Então:

$$\delta = f(L_s, g, D, \rho, \mu)$$

ou noutra forma

$$f(\delta, L_s, g, D, \rho, \mu) = 0$$

Partindo desta equação e escolhendo para variáveis fundamentais D , ρ e μ , por aplicação do teorema de Buckingham - ver Kay e Nedderman (1974) - obtêm-se:

$$f \left(\delta/D, L_s/D, \frac{D^{3/2} g^{1/2} \rho}{\mu} \right) = 0$$

Como já se referiu no Capítulo 3, $U_s = \lambda \sqrt{gD}$ e pode então escrever-se $Re = \frac{U_s D}{\nu} = \lambda \frac{D^{3/2} g^{1/2}}{\nu}$ em que λ é constante desde que $\frac{g D^3}{\nu^2} > 10^4$ - ver White e Beardmore (1966). Então pode escrever-se:

$$f \left(\delta/D, L_s/D, Re \right) = 0$$

No caso dos "slugs" terem comprimento suficiente para que a película de líquido atinja o seu valor crítico ($L_s > L_{sc}$), a relação anterior toma a forma:

$$f \left(\delta_c/D, Re \right) = 0$$

ou

$$\frac{\delta_c}{D} = f(Re) \quad (5.5)$$

A existência desta dependência funcional era previsível por manipulação da equação (3.22) (espessura crítica da película de líquido no caso de $\delta/R \ll 1$):

$$U_s = \frac{2}{3} \frac{g}{v} R^2 \frac{\delta_c^3}{R^3}$$

que após rearranjo dá:

$$\left(\frac{\delta_c}{D}\right)^3 = \frac{3}{2} \frac{U_s v}{g D^2}$$

ou sabendo que $U_s = \lambda \sqrt{gD}$:

$$\left(\frac{\delta_c}{D}\right)^3 = \frac{3}{2} \lambda \frac{v}{D U_s} = \frac{3}{2} \lambda \frac{1}{Re}$$

o que confirma a dependência obtida através da análise dimensional (5.5).

Uma análise da dependência de qualquer outra variável característica da geometria do sistema pode ser levada a cabo de modo análogo ao acima utilizado para determinar a dependência de δ . Assim, para a "flecha" da esteira, L_e , concluir-se-á que:

$$\frac{L_e}{D} = f \left(Re, \frac{L_s}{D} \right) \quad (5.6)$$

e para $L_s > L_{sc}$ simplesmente:

$$\frac{L_{ec}}{D} = f (Re) \quad (5.7)$$

Em termos do volume da esteira a relação funcional será:

$$\frac{V_{ec}}{D^3} = f(Re) \quad (5.8)$$

É justamente esta a relação que permite generalizar os resultados traduzidos pela equação (5.1) para a coluna de 19 mm. De acordo com (5.8) a equação (5.1) passa a poder escrever-se:

$$\frac{V_{ec}}{D^3} = 2,14 \times 10^{-3} Re \quad (5.9)$$

Esta equação está representada na Figura 5.12.

Os resultados do estudo fotográfico permitem ainda construir alguns gráficos generalizados, L_{ec}/D e δ_c/D em função de Re (Figuras 5.13 e 5.14). Nestes gráficos as linhas a tracejado não correspondem a expressões analíticas, são apenas ajustes "a olho" que tentam traduzir a provável variação de cada um dos grupos adimensionais com Re .

Finalmente convém referir que a equação (5.9) é apenas válida para $Re < 264$, isto é, para a gama de Re em que a esteira se apresenta fechada, possibilitando o contraste de cor necessário para a execução deste estudo (contraste já muito tênue para $Re = 264$).

5.3 Visualização do escoamento do líquido na esteira de "slugs"

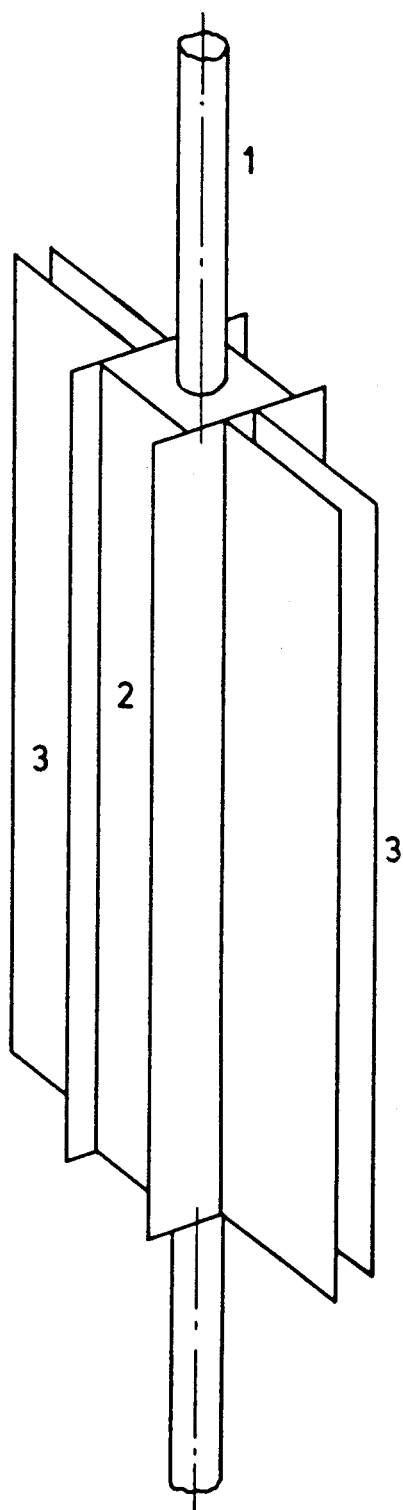
Pretendeu-se com este estudo obter uma visualização (através de fotografias) das linhas de corrente do líquido na esteira, bem como definir

(no caso de existir) a fronteira entre a esteira e o líquido que se encontra em movimento à sua volta, proveniente da película em queda livre entre o "slug" e a parede.

O facto de existirem sempre (em especial nos líquidos mais viscosos) bolhas de ar dimensões muito pequenas, emulsificadas no líquido, as quais se movimentam segundo as linhas de corrente do próprio líquido, levou a pensar em registar fotograficamente as trajectórias dessas bolhas.

Tirando fotografias com um elevado tempo de exposição e com a máquina fotográfica deslocando-se com uma velocidade igual à velocidade média da esteira (U_s), é possível obter a imagem dos rastros deixados por essas pequenas bolhas, vista dum referencial preso ao "slug". Com este fim, usou-se um pistão vertical accionado por um circuito óleo-hidráulico, no topo do qual foi montada a máquina fotográfica. A velocidade do pistão podia ser ajustada através da regulação da pressão do óleo no circuito. Em cada experiência media-se a velocidade dos "slugs" e impunha-se uma velocidade igual ao pistão e consequentemente à máquina fotográfica.

No intuito de fotografar apenas o movimento junto do plano que passa pelo eixo da coluna e é perpendicular à direcção de "incidência" da objectiva da máquina fotográfica, colimou-se a luz incidente por meio de frinchas laterais de espessura reduzida, conforme se indica na Figura 5.15.



- 1 - COLUNA
- 2 - CAIXA TRANSPARENTE
- 3 - ANTEPAROS NEGROS
- 4 - PROJECTOR

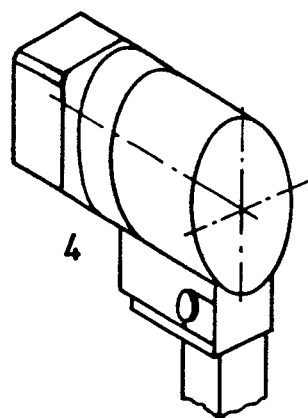


Figura 5.15 - Sistema de iluminação usado para estudar fotograficamente as trajetórias do líquido na esteira do "slug".

5.3.1 Descrição da instalação experimental

A instalação experimental era constituída por:

I) Uma coluna de vidro acrílico transparente (só foram obtidas fotografias em colunas com 52 mm de diâmetro interno)

II) Uma caixa paralelipipédica cheia com água, atravessada de topo a topo pela coluna, a qual tinha como função atenuar a distorção da imagem na superfície curva da coluna. Como se pode ver na Figura 5.15, os anteparos negros colimadores da luz foram adaptados a duas das faces laterais desta caixa paralelipipédica.

III) Um sistema de injecção de "slugs" constituído por um tubo cilíndrico situado na base da coluna e com um orifício com 4 mm de diâmetro, orientado para baixo. Note-se que não se utilizou o mesmo sistema que em estudos anteriores, já que não era importante a obtenção de "slugs" reprodutíveis em tamanho.

A entrada de ar na coluna era comandada manualmente, através de uma válvula de esfera montada na linha do ar comprimido a montante do tubo injector.

IV) Um sistema de iluminação constituído por dois projectores de 1000 W. Na Figura 5.15 está representado um destes projectores, o outro encontrava-se posicionado de igual maneira, mas no lado oposto em relação à coluna.

V) Um anteparo em papel preto, com uma frincha ao comprimento da coluna, colocado em torno da máquina por forma a atenuar a incidência de luz difusa sobre a lente.

5.3.2 Descrição do modo de operação

Na realização destas experiências o procedimento adoptado foi o seguinte:

- Após a determinação da velocidade de subida dos "slugs" por cronometragem do tempo necessário para percorrer uma certa distância, ajustava-se a pressão do óleo no circuito hidráulico de forma ao pistão (e máquina) subir a esta velocidade; considerava-se bom ajuste se a diferença relativa entre as velocidades fosse inferior a 1%. Após a injeção do "slug" que se pretendia fotografar e quando este passava no nível em que se encontrava a máquina em repouso (ponto inferior do avanço do pistão), accionava-se o circuito hidráulico. No instante em que o "slug" passava na zona enquadrada pela caixa paralelepipedica e iluminada pela luz colimada, disparava-se a máquina.

No fim de cada fotografia recolhia-se uma amostra de líquido e medidia-se a sua temperatura (igualmente sô eram consideradas válidas fotografias obtidas sem que a temperatura do líquido tivesse sofrido um aumento superior a $0,3^{\circ}\text{C}$). De seguida determinava-se a viscosidade à temperatura média entre o início e o fim da experiência.

5.3.3 Apresentação e discussão dos resultados obtidos

Nas Figuras 5.16 (a-n) encontram-se representadas (escala de 1:3) por ordem crescente de $Re (= \frac{U_s D}{\nu})$, algumas das fotografias obtidas.

Para valores de Re muito baixos (Figura 5.16a - $Re = 29$), a esteira, tal como se esperava do estudo da secção anterior, tem dimensões muito reduzidas sendo difícil detectar qualquer recirculação do líquido.

Com o aumento de Re , a esteira aumenta de dimensões, sendo a zona de recirculação do líquido perfeitamente diferenciada da do líquido em escoamento em torno do "slug" (ver Figuras 5.16 (b-g) - Re desde 56 a 162). As trajectórias desenvolvem-se em torno de um anel de vorticidade situado num plano perpendicular ao eixo da coluna. Por este facto, no "plano" iluminado, as trajectórias fechadas e irregulares apresentam-se simétricas em relação ao eixo da coluna.

Para $Re = 180$ e 182 (ver Figuras 5.16 h,i) embora as trajectórias se mantenham fechadas e regulares, começa a notar-se no "plano" iluminado, uma ligeira assimetria em relação ao eixo da coluna. Presume-se que este comportamento seja característico da transição laminar - turbulento do regime do líquido na esteira.

Para valores de $Re > 182$, as trajectórias no "plano" iluminado continuam a ser fechadas e regulares mas totalmente assimétricas (ver Figuras 5.16 j, k - $Re = 210$ e 304). Durante a realização destas experiências notou-se uma oscilação aparentemente periódica da base do "slug", tudo levando a crer que o anel de vorticidade oscile igualmente passando a situar-se em planos não perpendiculares ao eixo da coluna, o que justifica a assimetria

tria das trajectórias.

Para valores de Re superiores (Figuras 5.16 l, m - $Re = 500$ e 3880) observa-se um "emaranhado" de trajectórias irregulares e abertas, notando-se unicamente vestígios de trajectórias fechadas e regulares o que indica regime turbulento do líquido na esteira.

Na Figura 5.16 n, está representada uma fotografia obtida numa coluna de água ($Re = 13300$). Note-se a intensa circulação (agitação) do líquido dentro da esteira, em contraste com a reduzida circulação (agitação) do líquido que o "slug" e a esteira vão deixando para trás.

Sendo relativamente nítidos nas fotografias os traços correspondentes à parede da coluna ($D = 52$ mm), foi possível saber de uma maneira aproximada a escala de cada fotografia, o que permitiu determinar aproximadamente a "flecha" da esteira de "slugs" estabilizados (L_e/D), tanto para o caso dos líquidos viscosos como para a água.

Para os líquidos viscosos os valores de L_e/D assim obtidos encontram-se na Figura 5.17, sendo de notar a concordância com os obtidos no estudo efectuado na secção anterior numa coluna de 19 mm.

Para a água o valor de L_e encontrado é aproximadamente $2,0 D$ (relembre-se que este estudo foi efectuado numa coluna de 52 mm).

Ao fazer-se a comparação deste valor, com os valores de λ_e/D obtidos no Capítulo 4, é preciso notar que:

i) O valor de λ_e (altura de um "tanque" perfeitamente agitado que acompanha o "slug" na sua subida) contabiliza toda a mistura inclusivé a-

quela que se processa no líquido que a esteira vai deixando para trás.

ii) Não foi determinada, no Capítulo 4, a variação de ℓ_e/D com o diâmetro da coluna. Os valores obtidos foram: $\ell_e/D = 2,2 \pm 0,2$ para $D = 19$ mm e $\ell_e/D = 2,8$ para $D = 32$ mm.

Tomando o valor de ℓ_e/D obtido na coluna de 32 mm como sendo o correcto para a de 52 mm, é de prever que a mistura que se processa fora da esteira seja 20 a 30% da mistura total.

5.4 Transferência de líquido entre a esteira e o líquido circundante, durante a ascensão do "slug"

Pretendeu-se neste estudo quantificar o grau de permuta do líquido entre a esteira em ascensão e o líquido que está em escoamento à sua volta. Com base nos estudos das secções anteriores, é de prever que este grau de permuta seja reduzido numa esteira laminar (fechada) e que seja subitamente alterado quando o regime passa a ser de transição.

5.4.1 Descrição das instalações experimentais e modos de operação

Foram realizados dois tipos de experiências para estudar a transferência de líquido entre a esteira e o líquido circundante durante a ascensão de um "slug" num líquido viscoso.

As experiências tipo 1 com o objectivo de quantificar o rasto que a esteira de um "slug" deixa no líquido incolor ($z > 0$) em função de Re e

de ΔH . Nestas experiências, após a passagem do "slug", recolhia-se todo o líquido contido entre conjuntos de duas secções rectas distanciadas tipicamente de 50 mm (ver Figura 5.18a) e depois de o homogeneizar media-se a concentração de corante c . Com esta informação podia-se traçar um gráfico idêntico ao da Figura 5.18a).

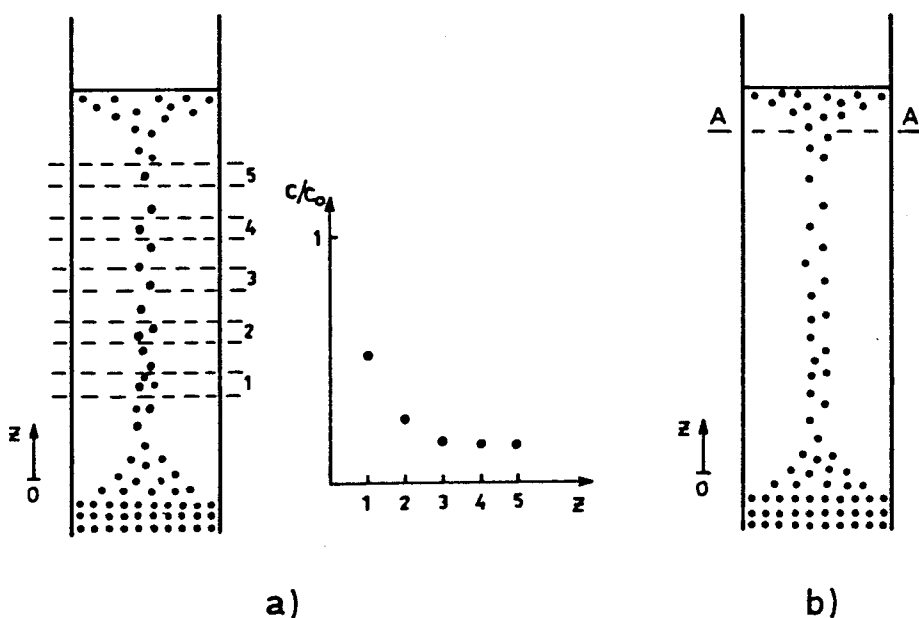


Figura 5.18 - Esquema da amostragem de líquido na coluna: a) experiências tipo 1; b) experiências tipo 2.

As experiências tipo 2 com o objectivo de determinar a quantidade de corante que ao fim de um dado comprimento de líquido incolor percorrido pelo "slug", ainda permanecia na esteira (igualmente em função de Re e ΔH). Com este fim, após a passagem do "slug", recolhia-se todo o líquido acima de uma secção recta (plano AA, Figura 5.18b) situada perto da

superfície livre, mas suficientemente abaixo dela, de forma a apanhar todo o corante existente na esteira. A amostra era homogeneizada e media-se a concentração designada por c_D . Com este valor e conhecendo o volume de líquido recolhido, determinava-se a massa de corante depositada pela esteira no topo da coluna (m_D). A comparação desta massa (m_D) com a existente na esteira para $z < 0$ ($m_O = c_O V_e$) permitia conhecer a quantidade de corante transferido durante a subida do "slug" na região $z > 0$.

É óbvio que as informações fornecidas por cada um destes tipos de experiências devem ser complementares.

Na execução das experiências referenciadas por tipo 1, usou-se uma secção de teste idêntica à utilizada no estudo da mistura provocada pela passagem de "slugs" em água (rever 4.4), constituída alternadamente por válvulas de esfera e secções de recolha de amostras de igual diâmetro interno ($D = 19$ mm) (rever Figura 4.11).

Nas referenciadas por tipo 2, usou-se uma instalação constituída por duas secções de tubo de vidro acrílico transparente, separadas por uma válvula de esfera de igual diâmetro ($D = 19$ mm). Na base da secção inferior montou-se outra válvula de esfera, a qual permitia a introdução do "slug" na coluna.

De forma a eliminar a mistura provocada pela injeção, concebeu-se um novo sistema de introdução do "slug". Construiu-se um tubo cilíndrico oco, tapado numa das extremidades e roscado na outra, com volume interno bem definido (ver Figura 5.19).

Com o auxílio de um tampão roscado na válvula montada na base, en-

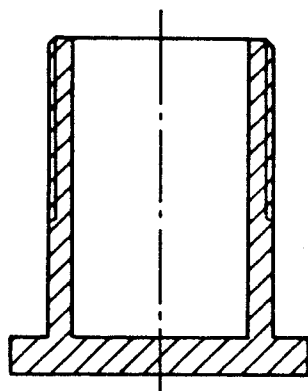


Figura 5.19 - Representação (em corte) da peça utilizada para injeção do "slug".

chia-se com líquido corado a secção inferior da coluna (inclusivê o interior das válvulas de esfera) e com líquido incolor a secção superior. Retirava-se o tampão, com a válvula da base fechada e roscava-se o tubo oco. Quando se pretendia introduzir o "slug", abria-se a válvula da base e o ar, que se encontrava no interior do tubo, subia ao mesmo tempo que toda a coluna de líquido se deslocava para baixo. Esta forma de injeção provocava uma mistura reduzida, contudo só era aplicável quando se pretendia estudar a acção de um só "slug".

A recolha de amostras era feita, nas experiências tipo 1, como no estudo da mistura em água; tomas laterais em cada secção, com recolha total do líquido contido entre duas válvulas. Nas experiências tipo 2, como se pretendia somente recolher o líquido do topo da coluna, construíram-se tomas laterais (espaçadas de 20 mm) e situadas nos últimos 100 mm previs-

tos de coluna de líquido.

O modo de operação em ambas as colunas era basicamente o mesmo que nas experiências com água (descritas em 4.4).

Convém referir que foi feito um controlo bastante apertado da temperatura de ambas as soluções (corada e não corada). A temperatura das soluções era medida, quer antes de se encher a coluna (ambas as soluções tinham que estar à temperatura ambiente), quer após a realização da experiência. Só se consideravam experiências válidas, aquelas em que não houvesse uma variação de temperatura, entre o início e o fim, superior a $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$.

5.4.2 Apresentação e discussão dos resultados experimentais obtidos

Os resultados obtidos nas experiências tipo 2 mostraram-se bastante esclarecedores no que respeita à estrutura da esteira e à sua variação com Re . Nas Figuras 5.20 (a-c) são apresentados estes resultados para "slugs" com $\Delta H = 12, 24$ e 60 mm respectivamente (altura de líquido incolor percorrido pela esteira (H_T) 1 m e $D = 19$ mm), sendo a Figura 5.21 uma sobreposição das 3 anteriores. Em ordenadas representou-se a razão entre a massa de corante depositada no topo e a concentração inicial ($V_D = m_D/c_0$ em que V_D é o volume de líquido concentrado, $c = c_0$, que tem massa de corante igual à que é depositada no topo da coluna).

Contudo V_D só poderá traduzir um determinado comportamento da esteira quando comparado com V_e , o qual depende, como já foi dito, de Re e de ΔH (para um dado Re só para valores de $\Delta H > \Delta H_c$, V_e torna-se constante e igual a V_{ec}). Comparando os valores de ΔH usados nestas experiências ($\Delta H =$

= 12, 24 e 60 mm) com os valores previsíveis de ΔH_c (Figura 5.6), nota-se que $\Delta H_c > 12$ mm a partir de $Re \approx 60$ e que sō para Re na ordem dos 180 ē que $\Delta H_c \approx 24$ mm, sendo para qualquer $Re < 264$ inferior a 60 mm. Assim os valores de V_e a utilizar na comparaçāo com V_D para "slugs" com $\Delta H = 24$ e 60 mm podem ser fornecidos com boa aproximaçāo pela equaçāo (5.1). Jā os valores de V_e a utilizar para "slugs" com $\Delta H = 12$ mm tēm que ser obtidos a partir das tendēncias previstas na Figura 5.6, sendo por consequēncia valores menos rigorosos.

Com base nos valores de V_e assim encontrados, traçou-se a Figura 5.22, na qual se representou em ordenadas a razāo V_D/V_e e em abcissas Re . Neste grāfico, um primeiro aspecto que importa salientar, ē a elevada quantidade de corante transportada pela esteira (a maior parte dos valores de V_D/V_e encontram-se numa faixa entre 0,4 e 0,55). Este comportamento traduz uma certa "impermeabilidade" da esteira ao líquido que circula ā sua volta (esteiras fechadas).

Convēm neste ponto fazer um pequeno parêntesis e realçar a importância desta "impermeabilidade" no estudo da mistura longitudinal em colunas de borbulhamento a operarem em regime de "slugging". Para tal imaginem-se duas situaçōes bem concretas:

1) Um reactor gás-líquido com reacçāo química na fase líquida a operar em contra-corrente (por hipótese sem coalescēncia na fase gasosa) - ver Figura 5.23a. Neste caso a "impermeabilidade" da esteira conduz a uma intensa reciclagem da fase líquida, isto ē, parte do líquido que se apresenta a sair na base ē novamente transportado na esteira para o topo da co-

luna, aumentando assim a distribuição dos tempos de residência da fase líquida na coluna.

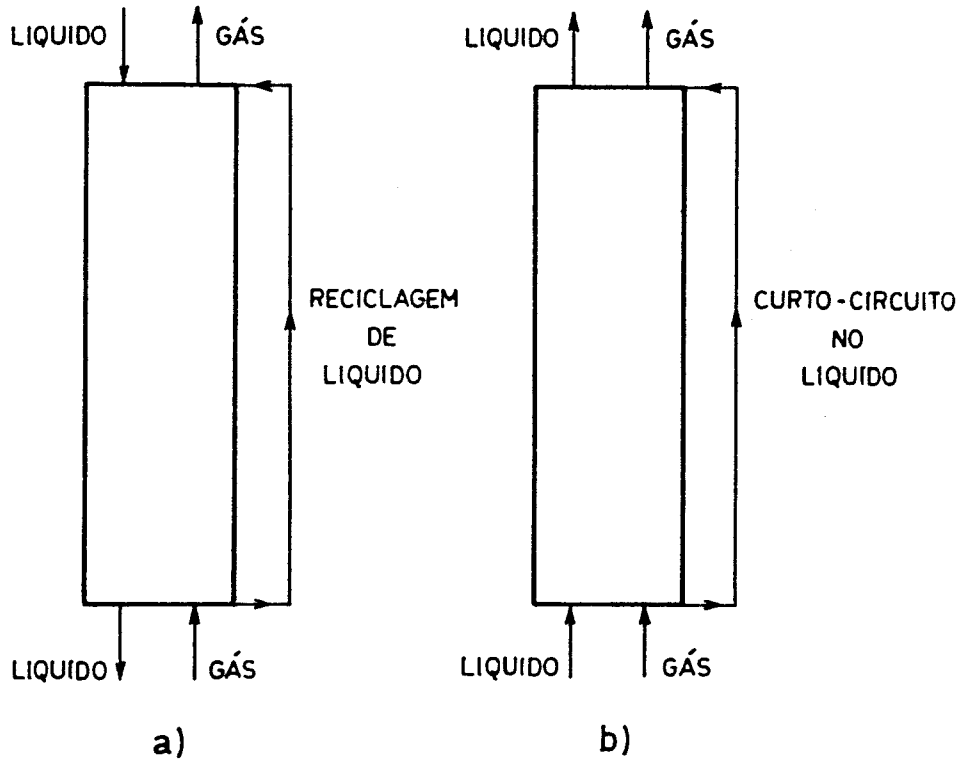


Figura 5.23 - Colunas de borbulhamento gás-líquido: a) coluna a operar em contra-corrente com reciclagem provocada pela esteira; b) coluna a operar em co-corrente com a fase líquida curto-circuitada pela esteira.

11) Um reactor gás-líquido com reacção na fase líquida a operar em co-corrente (igualmente por hipótese sem coalescência da fase gasosa ao longo da coluna), ver Figura 5.23b. Neste caso a esteira curto-circuita a fase líquida, isto é, parte do líquido que entra na base é rapidamente transportado pela esteira até à saída do reactor, o que provoca uma diminuição

da conversão da reacção nessas fracções.

Qualquer destes dois comportamentos é bastante relevante no projecto de reactores gás-líquido (a operarem em regime de "slugging"), em especial quando é exigido um controle apertado na conversão da reacção.

Um segundo aspecto a salientar da análise da Figura 5.22 é a quebra súbita do transporte na esteira acima de dados valores de Re (função de ΔH); para $\Delta H = 12$ mm observa-se esta quebra para $Re = 200$, para $\Delta H = 24$ mm esta quebra ocorre para $Re = 170$ e finalmente para $\Delta H = 60$ mm ocorre para $Re = 125$. Esta quebra parece traduzir o fim da estrutura "fechada" da esteira, com o consequente aumento da troca de soluto com o líquido circundante durante a subida do "slug"

Interessa de seguida estudar a variação desta gama de transição com ΔH .

Como já foi referido, a película de líquido que escorre entre o "slug" e a parede ainda não atingiu o seu valor crítico (ΔH_c) em "slugs" com $\Delta H = 12$ mm, qualquer que seja $Re > 60$ (rever Figura 5.6), enquanto que para $Re > 180$, $\Delta H_c \approx 24$ mm. Assim a velocidade média do líquido que atinge a base de um "slug" com $\Delta H = 12$ mm é inferior à que atinge a base de "slugs" com $\Delta H = 24$ e 60 mm. Se a transição dependesse somente do escoamento do líquido em torno da esteira, seria de prever que os valores de Re de transição se apresentassem mais elevados no caso de "slugs" ainda longe de estarem estabilizados ($\Delta H = 12$ mm), o que na realidade acontece. Contudo a partir do momento que $\Delta H > \Delta H_c$, o valor de Re que marca o início da transição devia ser independente de ΔH .

O facto de se terem observado valores de Re diferentes para a quebra de transporte em "slugs" com $\Delta H = 24$ e 60 mm parece indicar que a película lateral em "slugs" com $\Delta H = 24$ mm ainda não está totalmente estabilizada para $Re < 180$. Recorde-se que os valores críticos (L_{sc} , ΔH_c) foram obtidos numa análise teórica aproximada e por conseguinte sujeitos a um certo grau de incerteza. Partindo deste princípio, o início do regime de transição na esteira de um "slug" estabilizado dá-se para $Re = 125$.

Os resultados obtidos nas experiências de tipo 1, são confirmados pela análise dos resultados encontrados nas de tipo 2, a qual é feita em seguida.

O facto de se terem realizado somente experiências com "slugs" de tamanho $\Delta H = 12$ mm (mantendo $H_T = 10$ mm e $D = 19$ mm), restringe um pouco esta análise. Contudo para este tamanho de "slugs" parece ser possível distinguir 3 regiões de Re , conforme se vê nas Figuras 5.24 e 5.25:

i) Para $Re < 200$ (esteira fechada) - Figura 5.24 - a concentração de corante deixada pela esteira ao longo do líquido incolor é sensivelmente constante, dependendo o valor de c/c_0 de Re .

Este tipo de rasto é bem visível nas fotografias da Figura 5.5; uma "linha" situada ao longo do eixo da coluna, de coloração muito semelhante em qualquer ponto. É de admitir que sendo a esteira "impermeável" ao líquido à sua volta, a troca de soluto se dê principalmente por mecanismos de difusão molecular através da fronteira ($c \approx c_0$ na esteira e $c = 0$ no líquido circundante).

ii) Para $Re = 202$, a concentração de corante já não é constante no rasto deixado ao longo do líquido incolor (Figura 5.25). Em determinadas secções aparecem valores de c/c_0 extremamente elevados, sendo a concentração praticamente constante no resto da coluna.

Este comportamento está muito provavelmente associado ao desprendimento de porções de corante da esteira e marca, como já foi referido, o início da transição entre o regime laminar e o turbulento.

iii) Para $Re > 202$ nota-se um decréscimo (exponencial) de c/c_0 ao longo da coluna (Figura 5.25). Este comportamento está associado a uma troca considerável de líquido da esteira, que já não é fechada. Esta troca mais intensa acarreta que a esteira chegue ao topo com concentração praticamente nula.

5.5 Conclusões

Neste capítulo caracterizou-se o volume e a estrutura da esteira de "slugs" em ascensão em líquidos viscosos, bem como a mistura induzida pela esteira.

Através de fotografias instantâneas da esteira e do "slug" a subirem numa coluna ($D = 19$ mm) com líquido corado deste $z = -H_B$ até $z = 0$ e líquido incolor desde $z = 0$ até $z = H_T$, determinou-se a variação do volume da esteira (V_e) com $Re (= \frac{U_s D}{\nu})$ e ΔH . Concluiu-se que para cada Re , desde que $\Delta H > \Delta H_c$, o volume da esteira mantém-se constante e igual a V_{ec} (ver Figura 5.6). A variação de V_{ec} com Re é linear e a equação

(5.1) traduz correctamente esta variação desde que $Re < 264$.

Com base numa análise dimensional concluiu-se que o grupo V_{ec}/D^3 só é função de Re o que permitiu generalizar a equação 5.1; isto é, torná-la independente de D (ver equação 5.9).

Através deste estudo fotográfico foi ainda possível determinar a espessura crítica (δ_c) da película laminar de líquido que escorre entre a parede e o "slug" (equação 5.3). Os valores de δ_c obtidos, quando comparados com os determinados no Capítulo 3 (Tabela 5.2), permitem concluir que é com boa aproximação que o escoamento na película pode ser comparado com o escoamento laminar numa coluna de parede "molhada".

Com base em fotografias da esteira ($D = 52$ mm) tiradas com a máquina em movimento e com elevado tempo de exposição concluiu-se que:

I) Para $Re < 180$ o líquido dentro da esteira circula em trajectórias regulares e fechadas, sendo o eixo da coluna um eixo de simetria das trajectórias - Figura 5.16 (a-g).

II) Para $180 < Re < 304$ as trajectórias mantêm-se fechadas e regulares, mas é visível uma assimetria das trajectórias - Figura 5.16 (h-k).

III) Para $Re > 304$ as trajectórias são irregulares e abertas notando-se só vestígios de trajectórias fechadas - Figuras 5.16 l, m, n.

Estas fotografias ($D = 52$ mm) permitiram confirmar as conclusões da análise dimensional feita com base em valores obtidos na coluna de 19 mm, nomeadamente a forma de variação do grupo adimensional Le/D^3 com Re (Figura 5.17). As fotografias da esteira de "slugs" em ascensão numa co

luna de água ($D = 52 \text{ mm}$) permitiram concluir que a mistura resultante da intensa agitação do líquido na esteira é aproximadamente 70 a 80% da mistura total que se processa a jusante do "slug" (ver Figura 5.16 n).

Fizeram-se estudos, numa coluna de diâmetro 19 mm, de forma a quantificar a troca de líquido entre a esteira em ascensão e o líquido em escoamento à sua volta. Concluiu-se que, esteiras que apresentem trajectórias fechadas e simétricas transportam ainda, ao fim de 1 metro de coluna, 40 a 55% do seu líquido inicial (ver Figura 5.21). Para determinados valores de Re , função de ΔH , observou-se uma quebra súbita desta percentagem de líquido transportado. Para "slugs" com $\Delta H = 12$ e 24 mm ($\Delta H < \approx \Delta H_c$) observou-se esta quebra para $Re = 200$ e 170 respectivamente, enquanto que para $\Delta H = 60 \text{ mm}$ ($\Delta H > \Delta H_c$) foi a $Re = 125$. Presume-se que este último valor marque o início da transição laminar-turbulento na esteira de "slugs" estabilizados ($\Delta H > \Delta H_c$).

Verificou-se ainda que o rasto que uma esteira laminar deixa à sua passagem é uniforme em concentração (ver Figura 5.24) e que o rasto de uma esteira em regime de transição (para $\Delta H = 12 \text{ mm}$, $Re > 200$) apresenta:

I) Para valores de Re ligeiramente superiores a 200, uma concentração uniforme, interrompida aqui e além por picos de concentração (ver Figura 5.25).

II) Para valores substancialmente superiores a 200, um decréscimo exponencial de concentração (ver Figura 5.25).

CAPÍTULO 6

Expansão de colunas de borbulhamento gás-líquido e de leitos fluidizados, a operarem em regime de "slugging"

6.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado um estudo sobre a expansão de colunas de borbulhamento gás-líquido e de leitos fluidizados a operarem em regime de "slugging". Este estudo, embora não esteja na sequência directa dos realizados sobre estrutura e dimensões de esteiras de "slugs" e respectiva acção misturadora, resultou de observações feitas no seu decurso. Não sendo um estudo exaustivo, este capítulo tem como principal objectivo lançar novas pistas, em especial na compreensão do comportamento de leitos fluidizados a alta pressão.

A teoria das duas fases para fluidização agregativa - Toomey e Johnstone (1952), Davidson e Harrison (1963) - é útil na comparação do comportamento hidrodinâmico de colunas de borbulhamento gás-líquido com o de leitos fluidizados gás-sólido. Esta teoria considera o leito fluidizado como constituído por duas fases distintas:

i) Uma fase particulada (fase densa) percorrida por um caudal de gás igual ao caudal mínimo de fluidização, sendo a porosidade desta fase igual à porosidade do leito no ponto mínimo de fluidização.

ii) Uma segunda fase (fase de "bolhas") que transporta o caudal de gás excedente do necessário para fluidizar o leito.

Assim, em termos de velocidade superficial do gás (=caudal volumétrico/área da secção recta do leito):

$$U_G^e = U_G - U_{mf}$$

em que:

U_G - velocidade superficial do gás

U_{mf} - velocidade mínima de fluidização

U_G^e - velocidade do gás em excesso.

Esta teoria, que levantou uma acesa polêmica sobre a sua validade como é referido por Lockett et al. (1967), continua a ser uma boa aproximação da realidade, em especial para leitos fluidizados em que as bolhas se apresentem sob a forma de "slugs" (sendo pior para leitos que apresentem numerosas bolhas pequenas que não tenham uma rápida coalescência).

Uma propriedade importante da fase densa é a de ela se comportar como um líquido, nomeadamente os "slugs" subirem através dela à mesma velocidade que em água. Esta semelhança possibilitou o estudo das características dos leitos fluidizados por extrapolação dos resultados experimentais obtidos em colunas de borbulhamento gás-líquido.

Uma das propriedades importantes na fluidização gás-sólido é a expansão que o leito sofre para velocidades de gás superiores à velocidade mínima de fluidização. Neste capítulo é feita a comparação entre as expansões observadas experimentalmente em três sistemas distintos:

i) Colunas de borbulhamento de gás em líquidos de diferentes viscosidades cinemáticas.

ii) Colunas de borbulhamento de gás em suspensões de partículas neutras (força de impulsão aproximadamente igual ao peso das partículas)

iii) Leitos de pequenas partículas de vidro ("ballotini") fluidizadas por gás (quer por CO_2 quer por N_2) a diferentes pressões. Estes valores experimentais foram extraídos do trabalho de Guedes de Carvalho et al. (1978).

Nestes três sistemas os caudais de gás utilizados foram sempre elevados, de modo a permitir que as bolhas crescessem até formarem "slugs".

Por analogia com o efeito da viscosidade do líquido na expansão de colunas gás-líquido, é sugerida uma interpretação para os resultados observados em leitos fluidizados a alta pressão.

6.2 Alguns aspectos teóricos

6.2.1 Colunas de borbulhamento gás-líquido

A velocidade de um "slug" isolado numa coluna de líquido parado de diâmetro D (suficientemente elevado para que não haja efeitos de tensão superficial) é, como já anteriormente referido:

$$U_S = \lambda (g D)^{1/2} \quad (6.1)$$

em que λ é uma constante dependente da viscosidade cinemática do líquido e do diâmetro da coluna - ver White e Beardmore (1962).

Como já foi referido, a velocidade de ascensão de um "slug" é determinada pelo padrão de escoamento do líquido na sua zona frontal. Assim se o "slug" subir num líquido em escoamento, a sua velocidade é alterada.

Como é referido por Nicklin et al. (1962), é necessário adicionar à equação (6.1) uma parcela que contabiliza a acção exercida pelo líquido em escoamento em torno do "slug":

$$U_s = K U_L + \lambda (g D)^{1/2} \quad (6.2)$$

em que o valor de K depende do regime de escoamento do líquido (sendo consideradas boas aproximações, $K = 2$ para regime laminar e $K = 1,2$ para turbulento) e U_L é a velocidade média do líquido entre "slugs" (notar que $K U_L$ representa a velocidade máxima do líquido, observada no eixo da coluna).

Se o escoamento do líquido for só devido à introdução contínua do gás na base da coluna, por uma questão de continuidade - ver Nicklin et al. (1962) - $U_L = U_G$ (em que U_G representa a velocidade superficial do gás), resultando:

$$U_s = K U_G + \lambda (g D)^{1/2} \quad (6.3)$$

Designando por U_R a velocidade de subida do "slug" relativamente a um referencial que se move com velocidade U_L , igual à velocidade média do líquido entre "slugs", obtém-se:

$$U_R = U_s - U_L = K' U_G + \lambda (g D)^{1/2} \quad (6.4)$$

com $K' = K - 1$.

Admitindo que todos os "slugs" sobem com igual velocidade, U_R relativamente ao líquido, ao longo da coluna, Matsen et al. (1969) obtiveram uma expressão para a expansão que a coluna sofre, quando é continuamente alimentada por gás a uma velocidade superficial U_G :

$$H_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}} - H_0 = H_0 \cdot \frac{U_G}{U_R} \quad (6.5)$$

ou

$$H_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}} - H_0 = H_0 \cdot \frac{U_G}{K' U_G + \lambda \sqrt{g D}} \quad (6.6)$$

em que $H_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}}$ é a altura (máxima) da coluna no instante em que um "slug" rebenta à superfície (Figura 6.1) e H_0 a altura inicial do líquido.

Esta equação traduz correctamente a realidade, desde que a perturbação do campo de velocidades no líquido introduzida pela presença de um "slug", não se faça sentir na vizinhança do "slug" seguinte. A distância mínima entre dois "slugs" para que isto aconteça tem sido objecto de estudo de vários investigadores. Moissis e Griffith (1962) observaram que esta distância em colunas de borbulhamento de ar em água era aproximadamente 8 a 16 D e independente do comprimento dos "slugs" e do diâmetro da coluna. Clift et al. (1974) demonstraram a inexactidão deste valor, apresentando um estudo experimental realizado com líquidos de diferentes viscosidades (soluções de sacarose em que a viscosidade cinemática variava desde 1×10^{-6} até $1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$). Neste estudo é posta em evidência a influência da viscosidade no valor da distância mínima necessária para que não haja interac

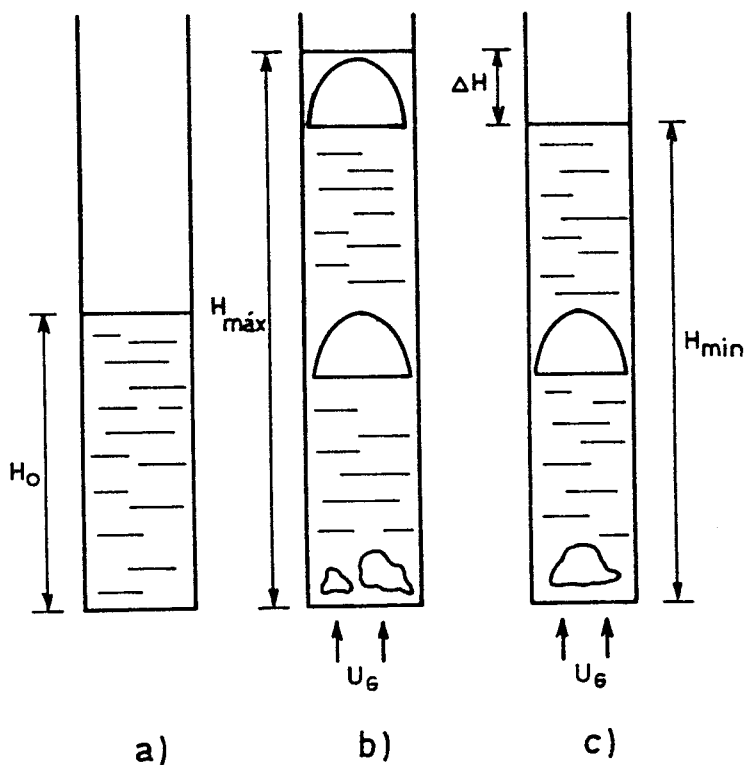


Figura 6.1 - Representação esquemática de uma coluna de borbulhamento gás-líquido a operar em regime de "slugging"; a) coluna de líquido; b) coluna no instante imediatamente anterior ao de um "slug" rebentar à superfície; c) coluna após o "slug" rebentar à superfície.

ção entre "slugs" (para valores crescentes de v observa-se uma diminuição significativa desta distância). Mais recentemente Dukler et al. (1984) apresentaram uma nova interpretação das causas que determinam este comprimento. O seu estudo contudo, só foi realizado em colunas de borbulhamento de ar em água. Nele, Dukler divide o líquido abaixo da base do "slug" em duas zonas:

i) Uma, designada por zona de mistura (3 a 3,5 D), cuja hidrodinâmica Dukler compara a de uma súbita expansão de um líquido numa conduta (esta comparação é baseada no facto de ambas as situações envolverem o "desbocar" de uma camada limite numa zona de recirculação).

Este comprimento foi designado no Capítulo 4 por comprimento da esteira, λ_e . Os valores obtidos nesse capítulo, embora próximos dos de Dukler, apontam contudo para uma dependência não linear com o diâmetro da coluna, facto não citado por este autor.

ii) Uma segunda zona de comprimento L_L , onde se dá a recuperação do perfil de escoamento do líquido imposto pelo desenvolvimento da camada limite na parede da coluna.

Se no caso da água (escoamento turbulento do líquido entre "slugs") o comprimento L_L é curto, no caso de líquidos viscosos (escoamento laminar do líquido entre "slugs") a extensão L_L já não é desprezável e deve dar-se atenção às seguintes situações:

i) Os "slugs" sobem na coluna de tal forma afastados que $L > L_L$ (ver Figura 6.2a). Nesta situação o perfil laminar ($Re_L = U_L D/\nu < 2100$) no líquido entre dois "slugs" desenvolve-se totalmente e a velocidade de um "slug" não é alterada pela presença simultânea de outros na coluna (equação (6.4) com $K' = 1$); a expansão da coluna é traduzida correctamente pela equação (6.6) com $K' = 1$.

ii) Os "slugs" sobem na coluna de tal forma que $L_e < L < L_L$ (ver Figura 6.2b). Neste caso, o perfil laminar não se desenvolve totalmente e o líquido que se encontra no eixo da coluna e à frente da zona frontal do

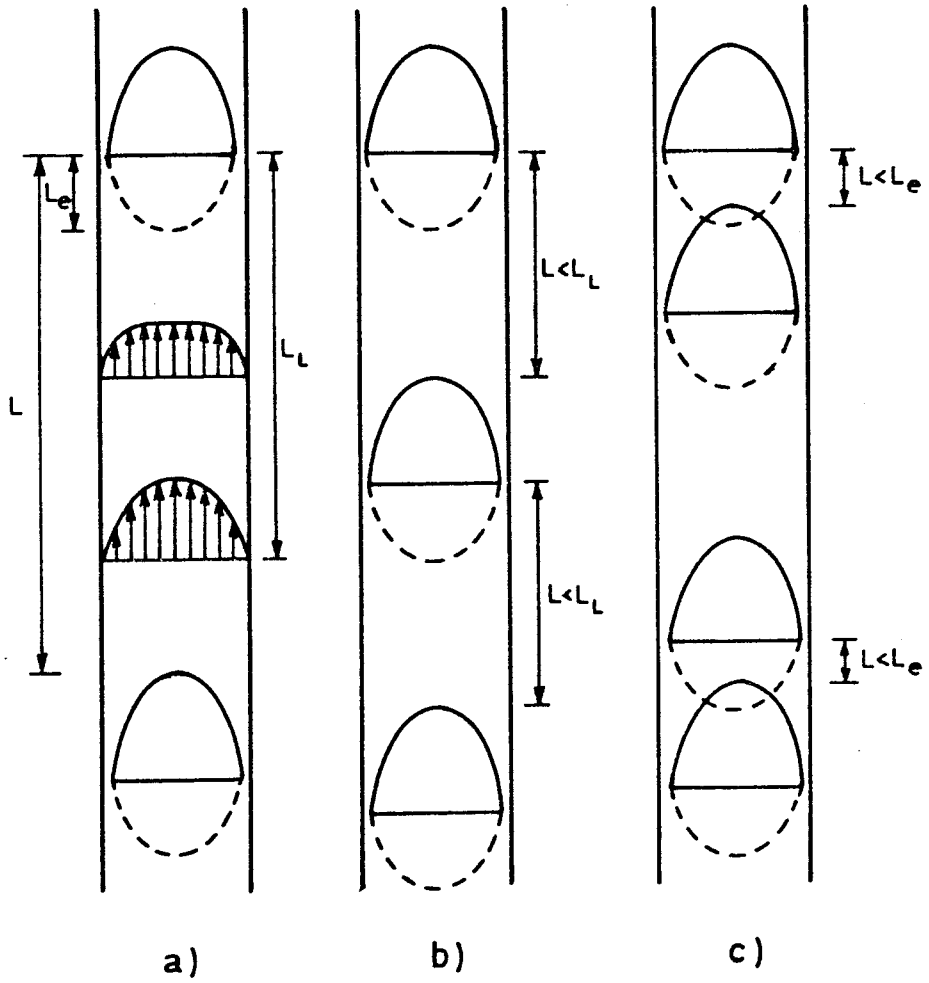


Figura 6.2 - Ilustração das possíveis distâncias (L) entre dois "slugs" consecutivos.

"slug", está em escoamento com uma velocidade inferior a $2 U_L$ ($K' < 1$); assim a velocidade do "slug" é menor do que a dada pela equação (6.4) com $K' = 1$ e a expansão será superior à dada pela equação (6.6) com $K' = 1$.

iii) Os "slugs" sobem na coluna de tal forma que $L < L_e$ (ver Figura 6.2c), isto é, um "slug" sobe na esteira do que o antecede. Pelo facto da esteira subir com o "slug" a que pertence (por hipótese não perturbado), a velocidade relativa da esteira é dada pela equação (6.4):

$$U_R = K' U_G + \lambda (g D)^{1/2}$$

Assim, a velocidade relativa de um "slug" que sobe na esteira do seu antecessor, será:

$$U_R = K' U_G + 2 \lambda (g D)^{1/2}$$

Para a gama de velocidades superficiais do gás estudada neste trabalho, a velocidade dada por esta equação com $K' < 1$ é sempre superior à dada pela equação (6.4) com $k' = 1$; a expansão da coluna será pois inferior à prevista pela teoria (equação 6.6 com $K' = 1$).

Note-se que a situação descrita conduz a que, numa coluna suficientemente elevada, os "slugs" que sobem a uma distância inferior a L_e , acabem por coalescer.

Numa coluna de água (escoamento turbulento no líquido) só esta última situação altera a velocidade dos "slugs" dada pela equação (6.4) com $K' = 0,2$ e por consequência a expansão dada pela equação (6.6) com $K'=0,2$.

6.2.2 Leitos fluidizados gás-sólido

Em leitos fluidizados, como já foi referido na introdução, a velocidade de um "slug" isolado, independentemente da pressão de operação, é a mesma que a de um "slug" isolado em água.

$$U_s = 0,35 (g D)^{1/2}$$

Porém, num leito fluidizado a condição de não deslizamento da fase densa sobre a parede da coluna não se observa, isto é, esta fase desloca-se em regime pistão, pois o sólido não adere à parede do tubo. Assim a velocidade absoluta de um "slug", num leito em que a fase densa se desloca a uma velocidade $U_D = U_G^e$, é:

$$U_s = K U_G^e + 0,35 (g D)^{1/2}$$

com $K = 1$

A velocidade relativamente à fase densa (U_R) é então:

$$U_R = 0,35 (g D)^{1/2} \quad (6.7)$$

Nesta situação a equação (6.6) apresenta a seguinte forma:

$$H_{\text{máx}} - H_o = H_o \cdot \frac{U_G - U_{mf}}{0,35 \sqrt{g D}} = H_o \frac{U_G^e}{0,35 \sqrt{g D}} \quad (6.8)$$

tendo sido esta equação deduzida por Matsen et al. (1969) no seu trabalho sobre expansão de leitos fluidizados.

Note-se que o escoamento na fase densa é sempre pistão, o que implica que só a situação representada na Figura 6.2c, pode alterar a velocidade dos "slugs" dada pela equação (6.7).

Analisando a equação de Ergum - ver Davidson e Harrison (1963) - conclui-se que num leito em que o escoamento intersticial é laminar, como é o caso de leitos de partículas de diâmetro reduzido, a velocidade mínima de fluidização é independente da pressão de operação. Assim, se por um lado a teoria das duas fases se mantivesse válida e por outro se não houvesse alteração das velocidades dos "slugs", seria de prever que a expansão do leito a uma dada velocidade superficial se apresentasse independente da pressão de operação.

Porém alterações a este comportamento foram observadas por Guedes de Carvalho e Harrison (1975) e Guedes de Carvalho et al. (1978) num leito de pequenas partículas fluidizadas a alta pressão (leito de partículas de vidro tipo "ballotini", de 64 μm , fluidizado quer por CO_2 quer por N_2 , a pressões entre 1 e 27 bar).

Guedes de Carvalho et al. (1978) observaram que para pressões crescentes do gás de fluidização, se dava uma diminuição significativa da expansão do leito, apesar da porosidade da fase densa aumentar apenas ligeiramente. Esta observação vai ser neste capítulo associada a uma diminuição da viscosidade aparente do leito com a pressão de operação.

Os elevados valores da viscosidade aparente encontrados nos leitos

fluidizados devem-se à forte interação entre as partículas, o que origina elevadas tensões de corte no leito. Grace (1970) avaliou a viscosidade dinâmica aparente de um leito fluidizado à pressão atmosférica como sendo entre 0,4 e 1,3 kg/m s (função da densidade e diâmetro das partículas utilizadas).

Em leitos fluidizados a alta pressão, o aumento, mesmo que ligeiro, da porosidade da fase densa - Guedes de Carvalho (1981), King e Harrison (1982) - implica uma menor interação entre as partículas o que conduz a uma diminuição da viscosidade do leito.

6.2.3 Colunas de borbulhamento de gás em suspensões de partículas

A expansão durante o borbulhamento de gás numa suspensão neutra (i.e, $\rho_{líq} = \rho_{sól}$) de partículas deve ser semelhante à obtida em leitos fluidizados, desde que a concentração de partículas seja suficientemente elevada (porosidade bastante baixa). Esta expectativa é legítima pois o comportamento da fase densa é "dominado" pela elevada concentração de partículas, que tal como no leito fluidizado, podem deslizar sobre a parede da coluna. Uma diminuição da concentração das partículas (aumento da porosidade da suspensão) levará a que o comportamento da fase densa seja gradualmente "dominado" pelo líquido, que não deslizando sobre a parede fará aproximar o comportamento da coluna, ao de um borbulhador gás-líquido.

6.3 Condições experimentais

6.3.1 Colunas de borbulhamento gás-líquido

As experiências consistiram na medida de $H_{m\acute{a}x}$ e $H_{m\grave{i}n}$ (ver Figura 6.1) em colunas de borbulhamento de ar, em regime de "slugging", em líquidos (de diferentes viscosidades), cobrindo uma gama alargada de velocidades superficiais.

Estas experiências foram realizadas em colunas de vidro acrílico transparente de diâmetro interno respectivamente 19, 32, 52 e 100 mm. Umesque ma da secção de teste utilizada está representado na Figura 6.3. A alimentação do ar era feita na base da coluna através de um orifício orientado para baixo de diâmetro interno 4 mm. Os caudais de ar eram medidos em rotâmetros previamente calibrados.

A leitura dos níveis ($H_{m\acute{a}x}$ e $H_{m\grave{i}n}$) era tomada usando uma escala de papel milimétrico presa à coluna. O valor anotado para cada nível era, devido ao tipo de fenómeno, um valor médio tomado durante um intervalo de tempo considerado significativo.

Foram realizadas experiências partindo de duas alturas iniciais: 1,10 m (experiências efectuadas nas 4 colunas) e 0,60 m (experiências efectuadas nas colunas de 52 e 100 mm de diâmetro).

Os líquidos utilizados (água, glicerina e soluções de água e glicerina) possibilitaram o estudo numa gama de viscosidade cinemática desde 1×10^{-6} até $7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

A temperatura de operação para cada experiência foi a ambiente. A

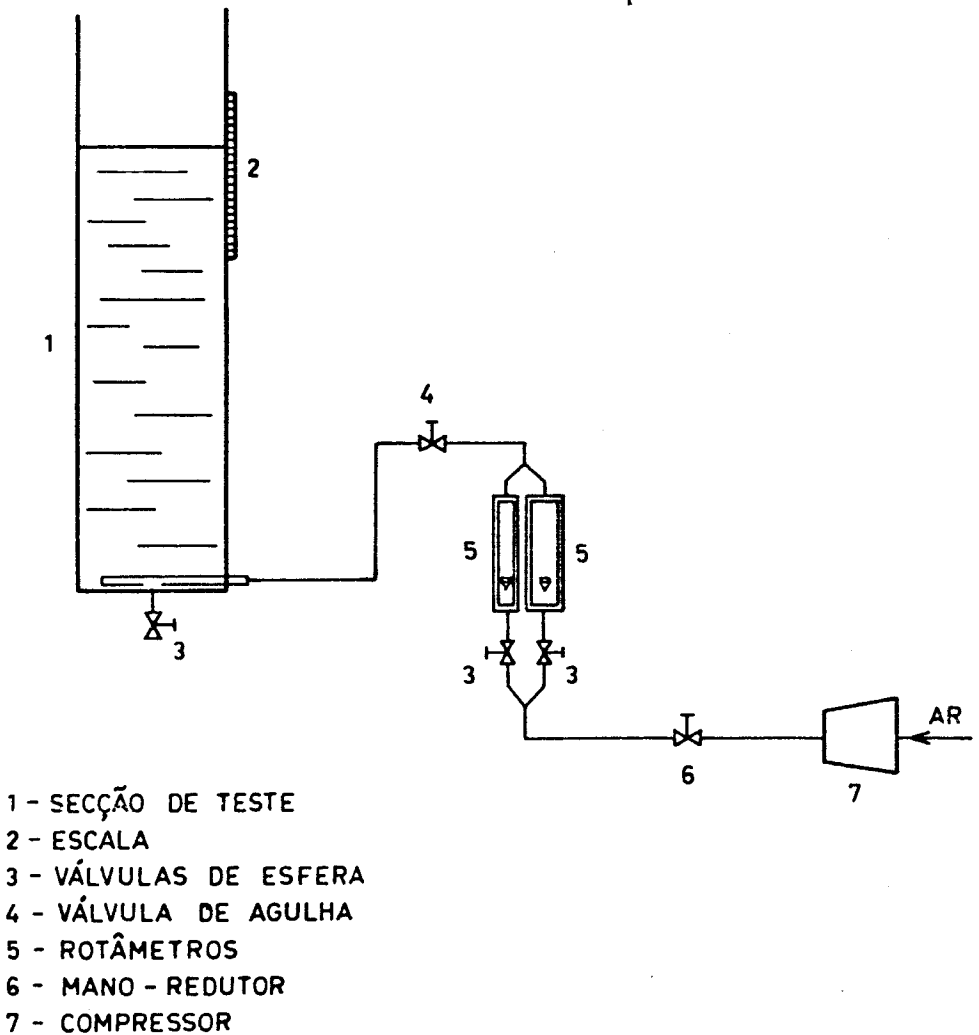


Figura 6.3 - Representação esquemática da secção de teste utilizada no estudo experimental.

temperatura do líquido era medida antes e depois de cada experiência.

No final do borbulhamento era recolhida uma amostra de líquido e determinada a respectiva viscosidade à temperatura média (entre o início e o fim da experiência). Esta medida era efectuada num viscosímetro tipo Cannon-Fenske previamente calibrado, mergulhado num banho termostatzado de elevada precisão ($\pm 0,05^{\circ}\text{C}$).

Durante a realização das experiências (especialmente nas que foram utilizados líquidos com elevada viscosidade cinemática), teve-se o cuidado de tomar as leituras dos níveis ($H_{\text{máx}}$ e $H_{\text{mín}}$) antes de se verificar qualquer emulsificação da fase líquida (por retenção de pequeníssimas bolhas de ar). Para tal, após a leitura para uma dada velocidade superficial, cortava-se a alimentação de ar e verificava-se se tinha havido ou não alteração do nível inicial (H_0). No caso afirmativo, esta leitura era repetida novamente, após a libertação das pequenas bolhas de ar constituintes da emulsão.

6.3.2 Colunas de borbulhamento de ar em suspensões de partículas

Estas experiências foram realizadas na coluna de diâmetro interno 52 mm, com uma altura inicial de suspensão (H_0) igual a 1,10 m (a secção de teste foi a descrita no parágrafo anterior).

As partículas (esferas de plástico) utilizadas apresentavam diâmetros na gama $80 \mu\text{m} < d_p < 800 \mu\text{m}$ e densidade muito próxima da água ($1,05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$).

Os valores da porosidade da suspensão utilizados foram nomeadamente $\epsilon = 0,27, 0,39$ e $0,51$. O primeiro valor ($0,27$) só foi possível, devido ao espectro alargado do diâmetro das partículas (devido às cargas electrostáticas apresentadas pelas partículas, seria difícil obter por peneiração uma gama mais apertada).

6.3.3 Leitos fluidizados gás-sólido a diferentes pressões

As condições experimentais, bem como a secção de teste, são descritas por Guedes de Carvalho et al. (1978). De uma forma sucinta, refira-se que os autores utilizaram partículas de vidro tipo "ballotini" de $64\ \mu\text{m}$, sendo as experiências realizadas numa coluna de 100 mm de diâmetro interno. A altura inicial (H_0) do leito fluidizado foi 1,10 m. Os gases utilizados na fluidização foram CO_2 e N_2 de 1,0 a 27,0 bar.

6.4 Análise dos resultados experimentais

6.4.1 Representação dos resultados

Os resultados experimentais obtidos, encontram-se representados nas Figuras 6.4 (a - f) e 6.5 (a - f). Também se representam nessas figuras, as curvas teóricas traçadas com base nas equações (6.6) e (6.8), para diferentes valores de K' e λ .

Na Figura 6.4 (a - f) representou-se a expansão, $(H_{\text{máx}} - H_0)/H_0$, da coluna em função da velocidade superficial do gás, U_G (em leitos fluidizados U_G^e).

Na Figura 6.5 (a - f) representou-se ΔH ($H_{\text{máx}} - H_{\text{mín}}$), igualmente em função da velocidade superficial do gás borbulhante.

As figuras a, b, c, d, e, f, correspondem as seguintes condições experimentais:

$$a - D = 19\ \text{mm} \quad , \quad H = 1,10\ \text{m}$$

$$b - D = 32 \text{ mm} , \quad H = 1,10 \text{ m}$$

$$c - D = 52 \text{ mm} , \quad H = 1,10 \text{ m}$$

$$d - D = 100 \text{ mm} , \quad H = 1,10 \text{ m}$$

$$e - D = 52 \text{ mm} , \quad H_o = 0,60 \text{ m}$$

$$f - D = 100 \text{ mm} , \quad H_o = 0,60 \text{ m}$$

Nos quadros anexos a estas figuras, estão representados os valores de Re ($= \frac{U_s D}{\nu}$), em que U_s é a velocidade de ascensão de um "slug" num líquido parado. Se bem que estes valores não tenham grande significado (para cada velocidade superficial do gás, U_g , a velocidade do "slug" é dada pela equação (6.4)), a sua representação irá auxiliar a compreensão do que é exposto nas secções seguintes.

6.4.2 Resultados obtidos em colunas com líquidos viscosos

O valor de Re_L ($= \frac{U_L D}{\nu}$) para os líquidos viscosos (todos excepto a água) foi sempre tal, que o perfil de velocidade do líquido deveria ser laminar ($Re_L < 2100$). Contudo, como já foi referido, para que este perfil se pudesse desenvolver totalmente seria necessário que a distância L fosse superior a L_L (rever Figura 6.2).

Analisando a Figura 6.4a, verifica-se que na coluna de menor diâmetro (19 mm) a expansão é superior à prevista teoricamente (equação (6.6) com $K' = 1$). Analisando em seguida os resultados obtidos nas colunas de maior diâmetro, para a mesma gama de velocidades superficiais do gás, verifica-se que a expansão da coluna vai diminuindo. Os pontos experimentais começam por estar próximos das curvas teóricas (colunas de diâmetro 32 e

52 mm - Figuras 6.4 b, c), encontrando-se nitidamente abaixo destas curvas nas experiências efectuadas na coluna de maior diâmetro (Figura 6.4 d) . Este afastamento é tanto mais acentuado quanto menor for a viscosidade do líquido.

Esta variação da expansão com o diâmetro da coluna não é surpreendente se se recordar (Capítulo 5) que para um dado valor de $Re(= \frac{U_s D}{\nu})$, o tamanho da esteira (L_e) aumenta com o diâmetro da coluna (rever Figura 5.17). Assim, quanto maior for o diâmetro da coluna, tanto mais provável é que a altura de líquido entre dois "slugs" consecutivos seja menor do que L_e , o que implica como já foi dito, um incremento da velocidade dos "slugs". Contrariamente em colunas de menor diâmetro e pelo facto do comprimento das esteiras ser reduzido, a altura de líquido entre "slugs" deverá ser superior a L_e , mas não o suficiente para se restabelecer totalmente o perfil laminar imposto pela parede da coluna, o que implica uma diminuição da velocidade dos "slugs".

Um outro aspecto importante é o de mesmo nas colunas de maior diâmetro, os valores experimentais obtidos com líquidos muito viscosos se manterem próximos das curvas teóricas. Este facto está de acordo com a interpretação anterior dos resultados, já que não só o comprimento da esteira, como também o comprimento necessário para se restabelecer o perfil laminar, são tanto mais reduzidos, quanto maior for a viscosidade cinemática do líquido - a análise para L_L é feita por analogia com o chamado efeito de entrada em tubos, ver Kay e Nedderman (1974)-o que implica uma maior probabilidade de um "slug" ascender na coluna sem que a sua velocidade seja alterada pela presença simultânea de outros "slugs".

Durante as experiências com $H_0 = 1,10$ m e em especial na coluna de maior diâmetro, levantou-se a dúvida da razão H_0/D ser ou não suficiente para não se atender, na análise da expansão, ao efeito acelerador da zona de formação dos "slugs" (base da coluna). Para estudar este efeito realizaram-se nas colunas de maior diâmetro (52 e 100 mm) experiências com $H_0 = 0,60$ m. Como se pode ver, comparando as Figuras (6.4 c) com (6.4 e) e (6.4 d) com (6.4 f), é de supor que o efeito de entrada não seja acentuado, já que as expansões obtidas são praticamente iguais.

Analisando as Figuras 6.5 (a - f), conclui-se que o tamanho dos "slugs" (ΔH) em líquidos viscosos vai diminuindo progressivamente com um aumento do diâmetro da coluna.

Assim e retomando as conclusões obtidas no estudo da expansão, tudo parece indicar que em colunas de reduzido diâmetro haja uma rápida coalescência dos "slugs" na base da coluna, subindo cada "slug" sem qualquer outro próximo (pelo menos numa distância superior a L_e). Contrariamente em colunas de diâmetro elevado a coalescência é menor, o que implica que os "slugs" subam muito perto uns dos outros e com as respectivas esteiras a alterarem significativamente as velocidades dos "slugs" que seguem no seu rasto. Note-se que um "slug" que altera o campo de velocidades na zona frontal do que o precede, pode ter igualmente à sua frente o campo alterado pelo seu antecessor.

6.4.3 Resultados obtidos em colunas com água

O número de Re_L para todas as experiências realizadas com água foi sempre superior a 2100. Assim o perfil de velocidade no líquido era turbulento (na equação (6.6), $K' = 0,2$) e a distância necessária para a recuperação do perfil, L_L , pouco externa.

Recordando o estudo do Capítulo 4, o tamanho da esteira de um "slug" em água é tanto maior, quanto maior for o diâmetro da coluna.

Analisando a Figura 6.4 a, $D = 19$ mm, concluiu-se que os pontos experimentais estão concordantes com a curva teórica. Esta concordância vai diminuindo nas experiências em colunas de diâmetro superior (Figuras 6.4 b, c, d), acabando os pontos experimentais por estarem, na coluna de maior diâmetro, perto dos obtidos com líquidos viscosos.

Analisando as Figuras 6.5 (a - f) conclui-se que o tamanho dos "slugs" (ΔH), vai diminuindo com um aumento do diâmetro da coluna.

Estes comportamentos (variação da expansão da coluna e do tamanho dos "slugs" com o diâmetro da coluna) são semelhantes aos verificados em líquidos viscosos, tendo por conseguinte as mesmas justificações; com a única diferença de L_L ser pouco extenso e os "slugs", na coluna de 19 mm, subirem sem terem o campo de velocidades à sua frente perturbado pela presença simultânea na coluna de outros "slugs".

6.4.4 Suspensões de partículas em água

O comportamento no que diz respeito à expansão de uma coluna com uma suspensão de partículas de elevada concentração ($\epsilon = 0,27$), deve, como

já foi referido, ser semelhante ao observado em leitos fluidizados com gás, pois em ambas as situações não se observa a condição de não deslizamento na parede (o "líquido" desloca-se em regime pistão, na equação (6.6) $K' = 0$). A Figura 6.4 c, mostra o excelente acordo da teoria com os valores experimentais obtidos.

Quando a concentração de partículas diminui (aumentando a porosidade de $\epsilon = 0,39$ e $\epsilon = 0,51$), a condição de não deslizamento começa a ser observada, passando o comportamento do leito a ser semelhante ao de uma coluna de líquido de elevada viscosidade. Este comportamento está de acordo com os resultados experimentais obtidos (Figuras 6.4 c e 6.5 c).

O facto do escoamento da suspensão mudar de regime, não permite estudar isoladamente o efeito da viscosidade da suspensão na expansão da coluna.

6.4.5 Leitos fluidizados gás-sólido

Os resultados obtidos por Guedes de Carvalho et al. (1978) com esferas ($d_p = 64 \mu\text{m}$) de vidro tipo "ballotini", fluidizadas por CO_2 a três pressões de operação (1 10 e 27 bar) estão representadas nas Figuras 6.4 d e 6.5 d.

É notório um decréscimo quer da expansão do leito, quer do tamanho dos "slugs" que rebentam à superfície, para pressões de operação mais elevadas.

É citado no trabalho de Guedes de Carvalho o facto de não se observarem alterações muito significativas na expansão da fase densa com a va-

riação da pressão, o que leva a concluir que esta fase se desloca sempre em escoamento pistão independentemente da pressão de operação (equação 6.8). Este facto elimina a dificuldade de interpretação dos resultados en contrada nas experiências com suspensões de partículas em água.

A associação do decréscimo da expansão da coluna com o facto da fa se densa permanecer inalterada, implica um diferente comportamento da fase de bolhas ("slugs"), nomeadamente um menor tempo de permanência dos "slugs" na coluna (i.e. uma maior velocidade absoluta).

Guedes de Carvalho et al. (1978) justificavam este comportamento com base num aumento da instabilidade dos "slugs", resultante da entrada de par tículas provenientes da esteira. A comparação dos resultados obtidos em co lunas de borbulhamento gás-líquido com os de Guedes de Carvalho (Figura 6.4 d. e 6.5 d), permite interpretar este comportamento de forma diferente, atribuindo à viscosidade da fase densa o principal papel.

King (1979) chegou à conclusão que a viscosidade aparente da fase densa de um leito de partículas de vidro tipo "ballotini" de $64\text{ }\mu\text{m}$ de diâmetro, fluidizado com CO_2 , decrescia de $1,3 \times 10^{-4}$ para $5 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$ quando a pressão aumentava de 1 para 20 bar. Esta diminuição foi atribuída por King e Harrison (1982), a um ligeiro aumento da porosidade da fase densa ($\epsilon = 0,436$ para $P = 1$ bar, $\epsilon = 0,442$ para $P = 10$ e 25 bar).

Assim, se o efeito provocado pelo decréscimo da viscosidade da fase densa for idêntico ao verificado nos líquidos (isto é, aceleração dos "slugs" devido ao campo de velocidades criado pela esteira dos "slugs" vizinhos), os resultados encontrados por Guedes de Carvalho, tornam-se então qualita-

tivamente justificáveis. Só um estudo mais detalhado permitirá um tratamento quantitativo deste efeito.

6.5 Conclusões

O estudo efectuado em colunas de borbulhamento de ar em líquidos viscosos, permitiu observar diferentes comportamentos da expansão do líquido, conforme o diâmetro da coluna e a viscosidade cinemática do líquido. Nomeadamente foi observado que numa coluna de 19 mm, a expansão é superior à prevista pela teoria (Matsen et al. (1969) - equação (6.6) com $K' = 1$), enquanto que em colunas de 52 e 100 mm, foi observado o contrário (expansão inferior à prevista). Este último comportamento (em especial na coluna de maior diâmetro) é tanto mais acentuado, quanto menor for a viscosidade cinemática do líquido (observando-se sempre $Re_L < 2100$).

Partindo do princípio que uma diminuição da expansão só é possível devido a um aumento da velocidade dos "slugs" (e vice-versa) e observando que o sentido da variação desta velocidade com D e com v é o mesmo que o da variação de L_e com esses parâmetros (Capítulo 5), é possível atribuir à acção da esteira a responsabilidade dos comportamentos observados na expansão.

O estudo efectuado em colunas de borbulhamento de ar em água, complementado com o do Capítulo 4 (variação de L_e com D), permitiu corroborar as conclusões obtidas no estudo com líquidos viscosos.

Guedes de Carvalho et al. (1978) observaram em leitos fluidizados a

operarem em regime de "slugging" uma diminuição da expansão com um aumento da pressão de operação. Se este aumento da pressão provocar um aumento, mesmo que ligeiro, da porosidade da fase densa, resulta, como refere King e Harrison (1982), uma diminuição significativa da viscosidade aparente desta fase. Assim, e por comparação com o estudo em colunas de borbulhamento de gás em líquidos viscosos, é possível atribuir ao aumento do comprimento da esteira (função de v), a responsabilidade da diminuição da expanção observada por Guedes de Carvalho.

Conclui-se ainda que as características do borbulhamento de gás em suspensões muito concentradas de partículas, são muito semelhantes às observadas em leitos de pequenas partículas fluidizadas por gás à pressão atmosférica.

CAPÍTULO 7

Conclusões

As conclusões mais relevantes desta tese podem ser agrupadas segundo os três grandes objectivos que orientaram o trabalho:

I) Conclusões respeitantes à caracterização e acção misturadora da esteira turbulenta de um "slug"

II) Conclusões respeitantes à caracterização e acção misturadora da esteira laminar de um "slug"

III) Conclusões respeitantes ao efeito da esteira na expansão de colunas de borbulhamento gás-líquido e leitos fluidizados a operarem em regime de "slugging".

O estudo efectuado sobre esteiras turbulentas foi apresentado nos Capítulos 3 e 4 tendo-se concluído que:

a) Os processos físicos responsáveis pela mistura longitudinal induzida pela passagem de um "slug" numa coluna de água são: o escoamento do líquido provocado pela entrada do "slug" na coluna, o escoamento do líquido nas zonas frontal e lateral do "slug" e o escoamento na região da esteira turbulenta.

b) A acção misturadora da esteira turbulenta é tanto mais dominante (relativamente à dos outros dois mecanismos), quanto maior for o diâmetro da coluna e quanto menores forem a viscosidade do líquido e o tamanho do "slug".

c) É possível determinar a altura de uma esteira suposta perfeitamente agitada, "presa" ao "slug" e onde se processa, por hipótese, toda a mistura a jusante da base do "slug".

d) A altura da esteira, determinada com base na conclusão anterior, de um "slug" suficientemente comprido que sobe isolado numa coluna de água de diâmetro 32 mm, é 90 ± 5 mm ($\lambda_e/D = 2,8 \pm 0,1$).

A altura da esteira de um "slug" suficientemente comprido que sobe isolado numa coluna de água de diâmetro 19 mm, é 42 ± 5 mm ($\lambda_e/D = 2,2 \pm 0,2$).

e) No caso dos "slugs" serem injectados cadenciadamente na coluna, há uma alteração no comportamento hidrodinâmico da esteira, resultando uma diminuição da mistura. Uma análise idêntica à realizada no caso dos "slugs" subirem isolados, mostra que na coluna de 32 mm, quando a cadência de injeção é elevada, esta alteração no comportamento da esteira provoca uma diminuição de 11% na mistura.

Na coluna de 19 mm esta diminuição é cerca de 18%.

f) A análise da mistura induzida pela esteira turbulenta pode ser igualmente feita com base no modelo de dispersão/difusão. Com base nesta análise, na coluna de 32 mm o valor do parâmetro que caracteriza a mistura provocada pela esteira de um "slug" suficientemente comprido, $(D_L t)_i$, é $4 \times 10^3 \text{ mm}^2$, enquanto que na de 19 mm, $900 \leq (D_L t)_i \text{ (mm}^2) \leq 1200$.

g) Com base em fotografias das trajectórias do líquido na esteira turbulenta, obtidas numa coluna de 52 mm de diâmetro, calcula-se que 70 a 80% da mistura a jusante da base do "slug" se processe na esteira. A restante processa-se no líquido que a esteira vai deixando para trás e é devida à atenuação no líquido da turbulência gerada pela passagem do "slug" e esteira. Assim, é de supor que a "flecha" de uma esteira (L_e) seja 70 a

80% do comprimento de mistura calculado (ℓ_e).

Em relação ao trabalho futuro será de grande interesse repetir o estudo experimental realizado, mas agora em colunas de diâmetro superior a 32 mm, o que permitirá obter a variação do tamanho da zona de mistura (ℓ_e/D) com o diâmetro da coluna e consequentemente com Reynolds. Este estudo deverá ser acompanhado da obtenção de fotografias elucidativas da circulação do líquido na esteira, de forma a ser possível quantificar a "flecha" L_e e a fracção de ℓ_e/D correspondente à mistura que se processa no interior da esteira.

O estudo efectuado sobre esteiras laminares foi apresentado no Capítulo 5, tendo-se concluído que:

a) A esteira laminar desempenha um papel importante na mistura longitudinal provocada pela passagem de um "slug" mas da sua acção não resulta uma boa mistura radial como no caso da água.

b) Em "slugs" suficientemente compridos (com tamanho suficiente para que a película de líquido que escorre entre o "slug" e a parede atinja a sua espessura limite), a razão V_e/D^3 varia linearmente com Reynolds ($= \frac{U_s D}{\nu}$).

c) As trajectórias do líquido numa esteira laminar são regulares e fechadas o que implica que o líquido se mantenha em recirculação dentro da esteira.

d) A recirculação do líquido é responsável pelo facto da esteira após percorrer 1 m de coluna ($D = 19$ mm), ainda transportar 40 a 55% do líquido inicialmente contido nela.

e) O fim do regime laminar na esteira e o início do de transição é marcado por uma oscilação da base do "slug" acompanhada de uma alteração das trajectórias do líquido.

f) A diminuição brusca da quantidade de líquido que a esteira ainda transporta ao fim de 1 m de coluna ($D = 19 \text{ mm}$), permite conhecer o número de Reynolds para o qual se inicia a transição. Para "slugs" estabilizados em ascensão numa coluna este valor é 125.

Em relação ao trabalho futuro será de grande interesse estudar numericamente a circulação do líquido na esteira laminar, através da resolução das equações de escoamento. Este estudo obriga a um conhecimento preciso do perfil de velocidade na película lateral do líquido, bem como da forma da base do "slug". Supõe-se que com o auxílio da anemometria laser será possível obter este conhecimento.

O estudo efectuado no Capítulo 6 sobre a expansão de colunas de borbulhamento permitiu tirar as seguintes conclusões:

a) Quanto maior for o diâmetro da coluna e menor for a viscosidade do líquido, tantos mais afastados estão os resultados experimentais dos previstos pela teoria (expansões menores que as previstas).

b) Um "slug" que sobe na esteira do seu antecessor tem à sua frente líquido em escoamento com uma velocidade superior à prevista pela teoria. Notando que o sentido da variação da expansão com o diâmetro da coluna e com a viscosidade do líquido é o mesmo que o sentido da variação do comprimento da esteira com estes parâmetros, é possível atribuir ao aumento do tamanho da esteira a responsabilidade do comportamento observado em

a).

c) Sabendo que num leito fluidizado a viscosidade da fase densa diminui com um aumento da pressão de operação e tendo Guedes de Carvalho observado uma diminuição da expansão desta fase com um aumento de pressão, o estudo efectuado em colunas gás-líquido permite justificar o comportamento observado por Guedes de Carvalho com base no aumento previsível do comprimento da esteira dos "slugs".

d) O estudo efectuado em colunas com suspensões de partículas neutras permite afirmar que as características do borbulhamento de gás em susensões muito concentradas são semelhantes às observadas em leitos de pequenas partículas fluidizadas por gás à pressão atmosférica.

Futuramente e de forma a permitir que o trajecto percorrido pelos "slugs" possibilite uma interacção "completa" entre os "slugs", está projectado repetir estas experiências em colunas que tenham uma altura aproximada de 10 m.

APÉNDICE A

A.1 Introdução

Considere-se uma coluna de líquido de comprimento H , inicialmente em repouso, contida num tubo cilíndrico vertical (ver Figura A.1a). É de notar que, por uma questão de conveniência de exposição, a origem do referencial dos eixos situa-se na base da coluna, contrariamente ao que foi adoptado em capítulos anteriores.

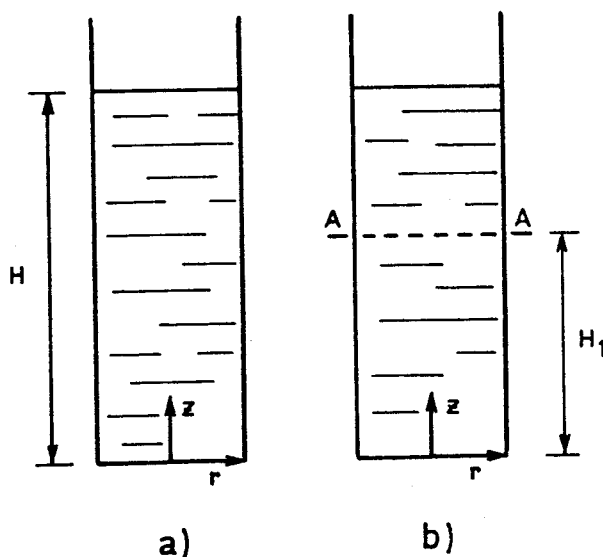


Figura A.1 - a) Representação esquemática da coluna de líquido;
b) Representação (em corte) do plano AA.

Quando na base da coluna ($z = 0$) se introduz uma certa quantidade de ar ($V_{ar} = A \Delta H_B$), a coluna de líquido é obrigada a deslocar-se no sentido positivo do eixo $\vec{Oz}$. A análise deste deslocamento, em especial o sofrido pelo fluído situado inicialmente numa secção recta longe dos extremos da coluna, é o principal objectivo deste apêndice.

Vai começar por se estudar a situação em que o ar é injectado a u ma pressão P constante.

A.2 Deslocamento sofrido por uma coluna de água, inicialmente em re- pouso, sujeita subitamente a uma pressão constante na sua base

Pretende-se saber a evolução no tempo do perfil de velocidade que se estabelece, quando a partir de um dado instante ($t = 0$), a coluna é su jeita a uma pressão constante, P , na sua base, diferente da pressão de re pouso P_0 . Este estudo foca os pontos principais dum trabalho de Szymanski (1930).

A.2.1 Perfil de velocidade

Em coordenadas cilíndricas, a equação de escoamento do líquido (su posto viscoso e incompressível) é:

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} = \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dz} - g \quad (A.1)$$

Com o intuito de se obter uma solução independente das dimensões da coluna (H , R) e das propriedades físicas do líquido (ρ , ν), introduzi-ram-se na equação (A.1) as seguintes variáveis adimensionais:

$$r' = r/R$$

$$t' = \nu t/R^2$$

$$z' = z/H$$

$$v'_z = v_z H/\nu$$

$$\frac{P'\nu}{R^2} = \frac{1}{\mu} (P + \rho gz)$$

A equação (A.1) toma então a forma:

$$\frac{\partial^2 v'_z}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v'_z}{\partial r'} - \frac{\partial v'_z}{\partial t'} = \frac{dP'}{dz'} \quad (\text{A.2})$$

e a sua solução terá de obedecer às seguintes condições inicial e fronteira:

$$v'_z = 0 \quad t' = 0 \quad 0 \leq r' \leq 1 \quad (\text{A.2.1})$$

$$v'_z = 0 \quad t' \geq 0 \quad r' = 1 \quad (\text{A.2.2})$$

$$\frac{\partial v'_z}{\partial r'} = 0 \quad t' \geq 0 \quad r' = 0 \quad (\text{A.2.3})$$

Sendo a pressão na base da coluna constante no tempo (facto traduzido pela condição $\frac{dP'}{dz'} = \text{constante}$) a equação (A.3) satisfaz a equação (A.2) em todo o seu domínio ($0 \leq r' \leq 1$ e $t' \geq 0$), a menos de uma descontinuidade para $t' = 0$ e $r' = 1$ - Szymanski (1930).

$$v'_z(r', t') = \frac{dP'}{dz'} \cdot \frac{1}{4} \left[(r'^2 - 1) - 8 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(K_n r') \exp(-K_n^2 t)}{K_n^3 J_1(K_n)} \right] \quad (\text{A.3})$$

em que

$J_1(x)$ - função de Bessel de 1.^a espécie e de 1.^a ordem da variável x .

$J_0(x)$ - função de Bessel de 1.^a espécie e de ordem 0 da variável x .

k_n - zero de ordem n da função de Bessel de 1.^a espécie e de ordem 0 ($J_0(k_n) = 0$).

A equação (A.3) pode ainda ser apresentada numa forma mais simplificada, o que facilita o seu uso. Ao verificar-se a validade da condição inicial (A.2.1), obtém-se:

$$(r'^2 - 1) = 8 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(K_n r')}{K_n^3 J_1(K_n)} \quad (\text{A.4})$$

e da substituição deste resultado na equação (A.3) resulta:

$$v'_z(r', t') = \frac{dP'}{dz'} \cdot \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8 J_0(K_n r') [1 - \exp(-K_n^2 t)]}{K_n^3 J_1(K_n)} \quad (\text{A.5})$$

É de notar o facto desta equação se reduzir à equação de Poiseuille, quando aplicada ao estado estacionário ($t' \rightarrow \infty$):

$$v'_z(r') = \frac{dP'}{dz'} \cdot \frac{1}{4} (r'^2 - 1) \quad (\text{A.6})$$

O conhecimento do perfil de velocidade permite determinar o tempo t_{inj} que uma dada pressão P (constante), deve actuar de forma a produzir um deslocamento médio ΔH_B da coluna de líquido.

A.2.2 Tempo de actuação de uma dada pressão P , de forma a produzir um deslocamento médio ΔH_B da coluna de líquido

Considere-se um plano AA, situado a uma cota $z = H_1$ (suficientemente longe dos extremos da coluna - ver Figura A.1b). O volume de líquido, $V_{l\dot{q}}$, que atravessa este plano quando a coluna sofre um deslocamento médio ΔH_B , é dado pelo seguinte integral duplo:

$$V_{l\dot{q}} = A \Delta H_B = \int_0^{t_{inj}} \int_0^R 2 \pi r v_z dr dt \quad (A.7)$$

em que t_{inj} representa o tempo durante o qual a coluna de líquido esteve sujeita à acção da pressão P .

Utilizando as variáveis adimensionais definidas anteriormente, obtem-se:

$$\Delta H'_B = 2 \int_0^{t'_{inj}} \int_0^1 r' v'_z(r', t') dr' dt' \quad (A.8)$$

em que:

$$\Delta H'_B = \frac{H \Delta H_B}{R^2} \quad (A.9)$$

Conhecendo o perfil de velocidade (A.5) da integração da equação (A.8), resulta:

$$\Delta H'_B = \frac{W}{4} \left\{ -\frac{1}{2} t'_{inj} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{16 [1 - \exp(-K_n^2 t'_{inj})]}{K_n^6} \right\} \quad (A.10)$$

com:

$$W = \frac{H R^2}{\rho v^2} \left(\frac{\Delta P}{H} + \rho g \right) \quad (A.11)$$

em que ΔP representa a diferença de pressão entre o topo e a base da coluna.

A Figura A.2 traduz graficamente esta relação (A.10). Cada curva corresponde a um diferente valor de $\Delta H'_B$, escolhido de acordo com as condições experimentais descritas no Capítulo 4, nomeadamente: $H = 2,0 \text{ m}$, $D = 19 \text{ mm}$ e $\Delta H_B = 50, 100 \text{ e } 300 \text{ mm}$.

É de notar que cada curva tende assintoticamente para $W \approx 0$ ($\Delta P = P_{\text{topo}} - P_{\text{base}} \approx -\rho g H$); o que significa que a pressão na base da coluna tende para a pressão hidrostática. Este comportamento traduz o facto de para tempos elevados, uma pressão ligeiramente superior à hidrostática ser suficiente para provocar um qualquer deslocamento $\Delta H'_B$.

Outro ponto a salientar, é o de utilizando na base de uma coluna com água ($v = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) de diâmetro interno 19 mm, pressões absolutas na ordem das 2 atm ($W \approx -1 \times 10^{-10}$), os tempos de injeção serem muito reduzidos ($t_{inj} < 0,2 \text{ s}$) para "slugs" com $\Delta H_B < 150 \text{ mm}$.

Conhecido o deslocamento médio sofrido por uma secção recta de fluido, resta conhecer o deslocamento de cada elemento dessa secção em função da sua posição radial.

A.2.3 Deslocamento sofrido por um elemento de fluido em função da sua posição radial

O deslocamento de um elemento de fluido que pertence quando em reposo ao plano AA (rever Figura A.1b), é dado pelo seguinte integral:

$$h(r, t_{inj}) = \int_0^{t_{inj}} v_z(r, t) dt \quad (A.12)$$

ou numa forma adimensional:

$$h'(r', t'_{inj}) = \frac{h(r, t_{inj})}{R^2} = \int_0^{t'_{inj}} v'_z(r', t') dt' \quad (A.13)$$

Da integração desta equação, com o auxílio do perfil de velocidade de (A.5), resulta:

$$h'(r', t'_{inj}) = \frac{W}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8 J_0(K_n r') \left\{ t'_{inj} - \frac{1}{K_n^2} [1 - \exp(-K_n^2 t'_{inj})] \right\}}{K_n^3 J_1(K_n)} \quad (A.14)$$

O elemento de fluido que se situa no eixo da coluna ($r' = 0$), é o que sofre um deslocamento máximo, $h'_{m\acute{a}x}$:

$$h'_{\text{m}\ddot{\text{a}}\text{x}}(0, t'_{\text{inj}}) = 4W \sum_{n=1}^{\infty} \frac{t'_{\text{inj}} - \frac{1}{K_n^2} [1 - \exp(-K_n^2 t'_{\text{inj}})]}{K_n^3 J_1(K_n)} \quad (\text{A.15})$$

Na Figura A.3 está representada a razão $h(r', t'_{\text{inj}})/h'_{\text{m}\ddot{\text{a}}\text{x}}(0, t'_{\text{inj}})$ em função de r' , a qual é independente de W . As diferentes curvas correspondem a diferentes valores do tempo de actuação (t'_{inj}) da pressão na base da coluna.

Na Figura A.4 está representada a razão entre o deslocamento máximo e o médio, $h'_{\text{m}\ddot{\text{a}}\text{x}}/\Delta H_B$, em função de t'_{inj} . É de notar que 10s ($t'_{\text{inj}} \approx 0,1$) após se iniciar o deslocamento, esta razão é ainda 1,5; longe de 2,0 que é o seu valor em regime de Poiseuille.

Nesta altura é oportuno discutir a aplicabilidade deste estudo  situação real de injecco de um "slug" na base da coluna (rever Figura 4.8).

 difícil o estudo da evolução da pressão do ar na base da coluna durante o tempo de abertura da válvula de solenóide, contudo a hipótese de pressão constante parece aceitável. Verificou-se experimentalmente que o tempo de abertura da válvula de solenóide (t_{inj}), em qualquer situação experimental descrita no Capítulo 4, não ultrapassou os 0,5 s. Segundo a Figura A.4 o deslocamento produzido seria então caracterizado por $h'_{\text{m}\ddot{\text{a}}\text{x}}/\Delta H_B < 1,1$.

Contudo, como adiante se salientar, este valor é inferior ao observado experimentalmente. Uma possível explicação é a de após a supressão

da pressão e durante a desaceleração da coluna de líquido, se produzir uma alteração no valor de $h_{\max}/\Delta H_B$. Este estudo é feito na secção seguinte.

A.3 Deslocamento sofrido por uma coluna de água, inicialmente em regime de Poiseuille sob a acção de uma pressão constante, a qual é subitamente suspensa

Imagine-se que o tempo de actuação da pressão foi suficiente para se desenvolver na coluna um escoamento permanente (regime de Poiseuille). O interesse desta secção é estudar os perfis que se desenvolvem na coluna, se bruscamente (para $t = 0$) se suspender a acção da pressão na base.

A.3.1 Perfil de velocidade

A equação de escoamento continua a ser a equação (A.2), agora sujeita a novas condições inicial e fronteira:

$$v'_z = \frac{W}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8 J_0(K_n r')}{K_n^3 J_1(K_n)} \quad t' = 0 \quad 0 \leq r' \leq 1 \quad (\text{A.16.1})$$

$$v'_z = 0 \quad t' \rightarrow \infty \quad 0 \leq r' \leq 1 \quad (\text{A.16.2})$$

Segundo W. Gerbes (1951), a equação (A.17) satisfaz a equação (A.2) e as condições (A.16.1) e (A.16.2):

$$v'_z(r', t') = \frac{W}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8 J_0(K_n r') \exp(-K_n^2 t')}{K_n^3 J_1(K_n)} \quad (\text{A.17})$$

sendo o segundo membro uma das parcelas da equação (A.5).

A.3.2 Deslocamento sofrido por um elemento de fluído em função da sua posição radial

Sabendo o perfil de velocidades (A.17) e recorrendo à equação (A.13) obtêm-se uma expressão para o deslocamento sofrido por um elemento de fluído em função da sua posição radial:

$$h'(r', t'_{\text{sup}}) = \frac{W}{4} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8 J_0(K_n r') [1 - \exp(-K_n^2 t'_{\text{sup}})]}{K_n^5 J_1(K_n)} \quad (\text{A.18})$$

em que t'_{sup} representa o tempo a partir do momento em que a pressão foi suprimida na base da coluna.

Determinando numericamente $h(r', t'_{\text{sup}})/h_{\text{máx}}(0, t'_{\text{sup}})$, conclui-se que esta razão é praticamente independente de t'_{sup} - ver W. Gerbes (1951). Por outras palavras enquanto que durante o arranque da coluna se nota uma lenta distorção do perfil de velocidade (rever Figura A.4), dada a desaceleração da coluna não resulta distorção adicional. Assim o valor $h_{\text{máx}}(0, t'_{\text{inj}})/\Delta H_B$ determinado para o arranque, não é alterado durante a desaceleração da coluna de líquido ($h_{\text{máx}}(0, t'_{\text{inj}})/\Delta H_B < 1,1$).

Como já foi anteriormente citado, um estudo experimental realizado aponta para valores deste parâmetro superiores a 1,1. De seguida são apresentadas as condições experimentais em que esse estudo foi realizado, bem como os resultados obtidos.

A.4 Descrição do estudo experimental e apresentação dos resultados obtidos

Para as mesmas condições utilizadas na realização das experiências descritas no Capítulo 4: tempo de injeção (t_{inj}), quantidade de ar injectado (ΔH_B), pressão a montante da válvula de solenóide (P) e alturas de líquido corado (H_B) e não corado (H_T), mediu-se o deslocamento sofrido pelos elementos situados inicialmente no plano de separação dos líquidos corado e não corado.

Para tal, utilizaram-se duas secções de coluna transparente separadas por uma válvula de esfera de diâmetro interno igual ao da coluna. A secção inferior era cheia com água corada e a superior com água sem corante.

Após a abertura da válvula de separação injectava-se um "slug" de características bem definidas (ΔH_B) e observava-se a olho nu o deslocamento máximo do líquido corado (sobre o eixo da coluna). Este deslocamento era posteriormente medido tomando como referência a superfície de separação inicial dos líquidos.

Este tipo de experiências foi repetido (foram realizadas aproximadamente 100 experiências em cada coluna), alterando nomeadamente t_{inj} , ΔH_B e P.

Os resultados obtidos podem ser sintetizados da seguinte forma:

i) Na coluna de 19 mm de diâmetro, $h_{m\acute{a}x}/\Delta H_B$ apresentava valores entre 1,5 e 1,6 (90% dos valores pertenciam a esta gama).

ii) Na coluna de 32 mm, $h_{\text{m}\ddot{\text{a}}\text{x}}/\Delta H_B$ apresentava valores entre 1,4 e 1,5 (95% dos valores obtidos pertenciam a esta gama).

No seguimento desta exposição serão tomados como correctos os valores encontrados neste estudo experimental, os quais são superiores aos obtidos no desenvolvimento teórico, facto que não tem justificação aparente a não ser se se admitir que a pressão na base da coluna decaia durante a introdução do "slug".

A.5 Expressão aproximada do avanço da coluna provocado pela injeção

Sendo necessário arranjar uma expressão analítica para o avanço da coluna que traduzisse a realidade de uma maneira aproximada e permitisse um tratamento numérico não muito complexo, procedeu-se do modo a seguir descrito.

Considerou-se que o avanço real da coluna pode ser aproximado pelo que seria produzido, numa situação puramente idealizada, por um escoamento pistão logo seguido dum de Poiseuille (ver Figura A.5). Nesta figura h_1 representa o avanço sofrido em regime pistão e $h_{2,\text{m}\ddot{\text{a}}\text{x}}$ o avanço máximo sofrido em regime de Poiseuille (elemento sobre o eixo da coluna)

É óbvio que:

$$h_{\text{m}\ddot{\text{a}}\text{x}}(0, t'_{\text{inj}}) = h_1 + h_{2,\text{m}\ddot{\text{a}}\text{x}} \quad (\text{A.19})$$

em que $h_{\text{m}\ddot{\text{a}}\text{x}}(0, t'_{\text{inj}})$ é conhecido do estudo experimental.

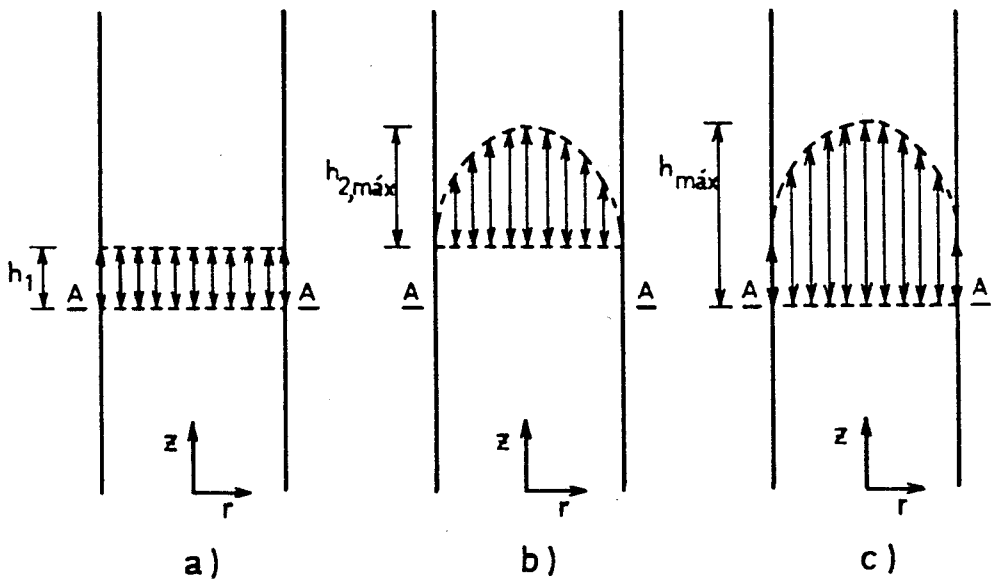


Figura A.5 - Avanço idealizado da coluna de líquido provocado pela injeção do "slug" a) escoamento pistão em que h_1 representa o avanço sofrido; b) escoamento de Poiseuille em que $h_{2,\text{máx}}$ representa o avanço máximo sofrido; c) escoamento idealizado em que $h_{\text{máx}} (=h_1 + h_{2,\text{máx}})$ representa o avanço máximo sofrido.

A determinação de h_1 e $h_{2,\text{máx}}$ pode ser feita por um simples balanço material (o volume de líquido deslocado tem de ser igual ao volume de ar injectado):

$$A \Delta H_B = A h_1 + h_{2,\text{máx}} \int_0^R 2 \pi r (1 - r^2/R^2) dr \quad (\text{A.20})$$

Combinando (A.19) com (A.20), resulta:

$$h_1 = \Delta H_B (1 - \alpha) \quad (\text{A.21.1})$$

$$h_{2,\text{máx}} = 2 \Delta H_B \alpha \quad (\text{A.21.2})$$

em que:

$$\alpha = \frac{h_{\max}(0, t'_{inj})}{\Delta H_B} - 1 \quad (A.22)$$

é um valor determinável experimentalmente.

A expressão analítica que descreve o avanço do líquido em função da sua posição radial é pois a seguinte:

$$h(r) = \Delta H_B (1 - \alpha) + 2 \Delta H_E \alpha (1 - r^2/R^2) \quad (A.23)$$

O avanço de cada elemento relativamente ao avanço médio será em -
tão:

$$h^*(r) = h(r) - \Delta H_B = \alpha \Delta H_E [1 - 2(r/R)^2] \quad (A.24)$$

A.6 Expressão analítica que traduz aproximadamente o avanço da coluna provocado pela expansão do "slug" durante a subida

Como já foi referido no Capítulo 4, pelo facto do escoamento provocado pela expansão ser de Poiseuille e consecutivo ao provocado pela injecção, é possível adicionar os respectivos efeitos.

Recorde-se ainda que o avanço médio de qualquer secção durante a expansão, foi tomado como sendo o sofrido pela secção média da coluna:

$$\Delta H_{\text{expa}} = \alpha_{\text{expa}} \Delta H_B \quad (A.25)$$

em que no caso concreto das experiências feitas na coluna de 19 mm ($H_B + H_T = 2,0$ m), $\alpha_{\text{expa}} \approx 0,1$.

Assim, a expressão adoptada para traduzir o deslocamento de uma dada secção recta de líquido devido à expansão foi:

$$h_{\text{expa}}(r) = 2 \alpha_{\text{expa}} \Delta H_B (1 - r^2/R^2) \quad (\text{A.26})$$

ou relativamente ao avanço médio:

$$h_{\text{expa}}^*(r) = h_{\text{expa}}(r) - \alpha_{\text{expa}} \Delta H_B = \alpha_{\text{expa}} \Delta H_B [1 - 2(r/R)^2] \quad (\text{A.27})$$

Adicionando os deslocamentos provocados pela injeção (A.24) e pela expansão (A.27), obtém-se:

$$h_T^*(r) = h^*(r) + h_{\text{expa}}^*(r) = \alpha_T \Delta H_B [1 - 2(r/R)^2] \quad (\text{A.28})$$

em que $\alpha_T = \alpha + \alpha_{\text{expa}}$.

Particularizando:

i) Para a coluna de 19 mm de diâmetro interno ($H_B + H_T = 2,0$ m), $0,6 < \alpha_T < 0,7$

ii) Para a coluna de 32 mm de diâmetro ($H_B + H_T = 2,60$), $0,53 < \alpha_T < 0,63$.

NOMENCLATURA

- A - área da secção recta da coluna.
- c - concentração de corante no líquido; intensidade do dipolo.
- c_e - concentração de corante no líquido que entra na esteira.
- c_e^* - concentração de corante na esteira.
- $c_i(z)$ - concentração de corante no líquido à cota z antes da injeção do "slug" $i+1$.
- $c_{i+1}^*(z,r)$ - concentração de corante no ponto (z,r) , após a injeção do "slug" $i+1$, mas antes da sua passagem por este ponto.
- $\bar{c}_{i+1}(z)$ - concentração de corante que se obtém quando se homogeniza o líquido situado à cota z após a injeção, mas antes da passagem do "slug" $i+1$.
- c_N - concentração de corante após passagem de N "slugs".
- c_o - concentração inicial de corante.
- c_s - concentração de corante no líquido que sai da esteira.
- D - diâmetro da coluna.
- D_L - coeficiente de difusão/dispersão axial.
- d_e - diâmetro equivalente de uma bolha.

- d_p - diâmetro das partículas.
- F - curva de Danckwerts.
- f - frequência de injeção dos "slugs" na base da coluna.
- g - aceleração da gravidade.
- H, H_0 - altura de líquido acima da base da coluna na ausência de bolhas;
altura de um leito no ponto mínimo de fluidização.
- H_B - altura de líquido corado na coluna.
- H_{eq} - altura da zona lateral do "slug".
- $H_{m\acute{a}x}$ - altura de uma coluna de borbulhamento (ou de um leito fluidizado) no instante em que um "slug" rebenta à superfície.
- $H_{m\acute{i}n}$ - altura de uma coluna de borbulhamento (ou de um leito fluidizado) após um "slug" ter rebentado à superfície.
- H_T - altura de líquido não corado na coluna.
- $h(r), h(r, t_{inj})$ - deslocamento sofrido por um elemento de fluido quando um "slug" é injectado na base da coluna.
- $h(r, t_{sup})$ - deslocamento sofrido por um elemento de fluido devido à supressão da pressão P que actuava na base da coluna.

$h^*(r), h^*(r, t_{inj})$ - deslocamento sofrido por um elemento de fluido, relativamente ao avanço médio do líquido, quando um "slug" é injectado na base da coluna.

$h'(r', t'_{inj}) = h(r, t_{inj}) H/R^2$ (equação A.13).

$h_{expa}(r)$ - deslocamento sofrido por um elemento de fluido devido à expansão do "slug" durante a subida na coluna.

$h_{expa}^*(r)$ - deslocamento sofrido por um elemento de fluido, relativamente ao avanço médio do líquido, devido à expansão do "slug" durante a subida na coluna.

$h_{m\acute{a}x}(0, t_{inj}), h_{m\acute{a}x}$ - deslocamento sofrido por um elemento situado no eixo da coluna quando um "slug" é injectado na base.

h_1 - deslocamento sofrido pelo líquido em escoamento pistão.

$h_{2, m\acute{a}x}$ - deslocamento máximo sofrido pelo líquido em escoamento de Poiseuille.

J - número de pontos experimentais.

$J_0(x)$ - função de Bessel de 1.^a espécie e ordem 0 da variável x .

$J_1(x)$ - função de Bessel de 1.^a espécie e 1.^a ordem da variável x .

- K - parâmetro que caracteriza o regime de escoamento do líquido numa coluna de borbulhamento (ou leito fluidizado).
- K' - $K - 1$.
- K_n - zero de ordem n da função de Bessel de 1.^a espécie e 1.^a ordem (Capítulo 3); zero de ordem n da função de Bessel de 1.^a espécie e ordem 0 (Apêndice A).
- L - distância entre a base de um "slug" e o "nariz" do que o precede.
- L_e - comprimento ("flecha") da esteira.
- L_{ec} - comprimento ("flecha") da esteira de um "slug" com película lateral de líquido estabilizada ($L_s > L_{sc}$).
- L_L - distância necessária (abaixo da esteira) para se dar a recuperação total do perfil de velocidade no líquido imposto pela parede da coluna.
- L_s - comprimento do "slug".
- L_{sc} - comprimento do "slug" para o qual a película lateral de líquido atinge a sua espessura mínima (δ_c).
- l_e - comprimento equivalente da esteira assumindo que toda a mistura a jusante da base do "slug" se processa na esteira.

- m - massa total de corante na coluna no início de cada experiência.
- m' - massa total de corante na coluna após a simulação da passagem de N "slugs".
- m_D - massa de corante depositada no topo da coluna pela esteira de um "slug".
- m_o - massa de corante existente na esteira do "slug" quando ele atravessa o plano $z = 0$.
- N - número de "slugs" injectados.
- 0 - origem do referencial.
- P - pressão.
- P_o - pressão de repouso.
- P' - $\frac{\rho R^2}{\mu^2} (P + \rho g z)$ (equação A.2).
- Q, Q_T - caudal de líquido deslocado pelo "slug" ($=U_S A$).
- Q_V - caudal volumétrico de gás borbulhante.
- R - raio da coluna.
- R_c - $R - \delta$.

R'_c - R_c/R .

R_{cu} - raio de curvatura da zona frontal do "slug".

r - coordenada radial.

r' - r/R .

T, t_{is} - tempo que o elemento de fluído mais rápido demora a atravessar a zona frontal do "slug" (ou lateral do "slug").

t - tempo.

t' - vt/R^2 (equação A.2).

t_D - tempo que um "slug" demora a percorrer um diâmetro de coluna.

t_i - tempo que cada elemento de fluído demora a percorrer a zona lateral do "slug" (ou frontal do "slug").

t_{inj} - tempo durante o qual se dá a injeção do "slug".

t'_{inj} - vt_{inj}/R^2 (equação A.2).

t_r - tempo de residência do líquido na esteira.

t_{sup} - tempo decorrido a partir do momento em que a pressão P , que actuava na base da coluna, foi suprimida.

- t'_{sup} - $v_{t_{sup}}/R^2$ (equação A.2)
- U_b^* - velocidade da base do "slug" durante a injeção de um novo "slug" na coluna.
- U_D - velocidade média, entre "slugs", da fase densa de um leito fluidizado.
- U_G - velocidade superficial do gás.
- U_G^e - $U_G - U_{mf}$.
- U_L - velocidade média do líquido entre "slugs".
- $\bar{U}_L$ - velocidade superficial média do líquido na coluna.
- U_{mf} - velocidade mínima de fluidização.
- U_R - velocidade de um "slug" relativamente a um referencial que se move à velocidade média do líquido entre "slugs".
- U_S - velocidade de subida de um "slug".
- V - volume.
- V_b - volume de uma bolha.
- V_D - razão entre a massa de corante depositada no topo da coluna e a

concentração inicial de corante ($=m_D/c_O$).

V_e - volume da esteira.

V_{ec} - volume da esteira de um "slug" com película de líquido estabilizada (δ_c).

V_s - volume de um "slug".

v_i - velocidade de um elemento de fluido na película lateral.

v_m - velocidade média do líquido na película lateral.

$v_{m,s}$ - velocidade média do líquido na película lateral, relativamente ao "slug".

$v_{m,s}^*$ - velocidade média do líquido na película lateral, relativamente ao "slug", durante a injeção de um novo "slug" na base da coluna.

v_r - componente radial da velocidade de um elemento de fluido.

v_z - componente axial da velocidade de um elemento de fluido.

v'_z - $v_z R/v$ (equação A.2).

v_z^+ - v_z/v_z^* (equação 3.25).

$$v_z^* - (\tau_\omega / \rho)^{1/2} \quad (\text{equação 3.25})$$

X - cota de proveniência do elemento mais lento, relativamente aos que com ele passam simultaneamente no plano $z' = -0,7$ (ou na base da película lateral).

$$X' - X/R.$$

$$X'' - X/H_{eq}.$$

y - coordenada axial numa placa plana.

$$W - \frac{H R^2}{\rho v^2} \left(\frac{\Delta P}{H} + \rho g \right) \quad (\text{equação A.11}).$$

z - coordenada axial.

$$z' - z/H ; \quad z/R.$$

$$z^+ - \rho z v_z^* / \mu \quad (\text{equação 3.25}).$$

LETRAS GREGAS

α - parâmetro que caracteriza o deslocamento do líquido durante a injeção do "slug" ($= h_{\max} / \Delta H_B - 1$, equação A.22).

α_{expa} - parâmetro que caracteriza o deslocamento do líquido devido à ex

pansão do "slug".

$$\alpha_T = \alpha + \alpha_{\text{expa}}.$$

ΔH - altura de líquido deslocado por um "slug", medida no instante em que o "slug" atinge a superfície livre (à pressão atmosférica).

$$\Delta H' = H \Delta H / R^2 \quad (\text{equação A.9}).$$

ΔH_B - altura de líquido deslocado por um "slug", medida quando o "slug" se encontra na base da coluna.

ΔH_C - valor de ΔH para o qual a película lateral de líquido atinge a sua espessura limite (δ_C).

$$\Delta H_B^* = \alpha_T \Delta H_B.$$

ΔH_{expa} - altura de líquido deslocado devido à expansão do "slug" durante a subida na coluna ($\alpha_{\text{expa}} \Delta H_B$).

ΔP - diferença da pressão entre o topo e a base de uma coluna de líquido durante a injeção.

$\Delta t_i, \Delta t$ - atraso em t , relativamente ao elemento mais rápido, sofrido por um elemento de fluído durante o escoamento na zona frontal do "slug" (ou lateral).

- $\Delta t_{100\%}$ - atraso em t do elemento mais lento, relativamente ao mais rápido, durante o escoamento na zona frontal do "slug" (ou lateral).
- $\Delta t_{90\%}$ - atraso em t do elemento mais lento, relativamente ao mais rápido, considerando só 90% dos elementos que estão em escoamento na zona frontal ou lateral (os 90% mais rápidos).
- Δz - dimensão da malha.
- $\Delta z_i, \Delta z$ - atraso em z , relativamente ao elemento mais rápido, sofrido por um elemento de fluido durante o escoamento na zona frontal do "slug" (ou lateral).
- $\Delta z_{100\%}$ - atraso em z do elemento mais lento, relativamente ao mais rápido, durante o escoamento na zona frontal do "slug" (ou lateral).
- $\Delta z_{90\%}$ - atraso em z do elemento mais lento, relativamente ao mais rápido, considerando só 90% dos elementos que estão em escoamento na zona frontal ou lateral (os 90% mais rápidos).
- δ - espessura da película de líquido entre o "slug" e a parede da coluna.
- δ^+ - $\rho \delta v_z^* / \mu$ (equação 3.25).
- δ_c - espessura mínima (limite) da película de líquido entre o "slug" e a parede da coluna.

$\delta_{c,exp}$ - valores de δ_c obtidos no estudo fotográfico.

ϵ - porosidade do leito.

ξ - δ/R .

θ - ângulo ao centro.

λ - $\frac{U_s}{\sqrt{gD}}$ (equação 3.10).

μ - viscosidade dinâmica do líquido.

ν - viscosidade cinemática do líquido.

ρ - densidade do líquido.

τ - $t U_s/R$

τ_w - tensão de corte na parede.

ψ - linha de corrente.

ψ' - $\psi/U_s R^2$ (equação 3.3).

ψ_i - linha de corrente do elemento i .

ψ'_p - linha de corrente junto à parede ($\psi' = 0,5$).

ψ'_s - linha de corrente sobre a superfície do "slug" (interface gás-líquido - $\psi' = 0$).

GRUPOS ADIMENSIONAIS

Re - Número de Reynolds ($= \frac{U_s D}{\nu}$).

Re_L - Número de Reynolds no líquido entre "slugs" ($= \frac{U_L D}{\nu}$).

Re_δ - Número de Reynolds na película de líquido entre o "slug" e a parede ($= \frac{v_m \delta}{\nu}$).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - Baird M.H.I., Rice R.G., Chem. Eng. J., 9, 171 (1975).
- 2 - Brotz W., Chem. Ing. Tech., 26, 470 (1954).
- 3 - Brown R.A.S., Can. J. Chem. Eng., 43, 217 (1965).
- 4 - Carslaw H.S., Jaeger J.C., "Conduction of Heat in Solids", Oxford at the Clarendon Press, Oxford (1959).
- 5 - Collins R., J. Fluid Mech., 22 (4), 763 (1965).
- 6 - Collins R., J. Fluid Mech., 25 (2), 469 (1966).
- 7 - Collins R., J. Fluid Mech., 28 (3), 97 (1967).
- 8 - Clift R., Grace J.R., Sollazo V., J. Heat Transfer, Trans. ASME (Aug), 371 (1974).
- 9 - Danckwerts P.V., Chem. Eng. Sci., 2, 1 (1953)
- 10 - Davidson J.F., Harrison D., "Fluidised Particles", Cambridge University Press, Cambridge (1963).

- 11 - Davidson J.F., Harrison D., "Fluidization", Academic Press, London (1971).
- 12 - Davies R.M., Taylor G., Proc. Roy Soc., A 200, 375 (1950).
- 13 - Dukler A.E., Bergelin O.P., Chem. Eng. Prog., 48, 557 (1952).
- 14 - Dukler A.E., Chem. Eng. Prog., 55, 62 (1959).
- 15 - Dukler A.E., Maron D.M., Brauner N., Chem. Eng. Sci., 40 (8), 1379 (1984).
- 16 - Dumitrescu D.T., Z. Ang. Math. Mech., 23, 139 (1943).
- 17 - Fernandes R.C., Semiat R., Dukler A.E., AIChE J., 29 (6), 981 (1983).
- 18 - Filla M., Donsi G., Crescitelli S., ICP Rivista Industria Chimica, Ano VII (10), (1979).
- 19 - Fulford G.D., Adv. Chem. Eng., 5, 151 (1964).
- 20 - Gerbes W., Z. Ang. Physik, 3, 267 (1951).
- 21 - Grace J.R., Can. J. Chem. Eng., 48, 30 (1970).

- 22 - Guedes de Carvalho J.R.F., Harrison D., Fluidised Combustion, Institute of Fuel Symp., Series nº 1, B₁ 1 - B₁ 6, London (1975).
- 23 - Guedes de Carvalho J.R.F., King D.F., Harrison D., "Fluidization", University Press, Cambridge (1978).
- 24 - Guedes de Carvalho J.R.F., Chem. Eng. Sci., 36, 1349 (1981).
- 25 - Hornebeck R.W., "Numerical Methods", Quantum Publishers INC, New York (1980).
- 26 - Joshi J.B., Trans. Instn. Chem. Engrs., 58 (1980).
- 27 - Joshi J.B., Shah Y.T., Chem. Eng. Commun., 11, 165 (1981).
- 28 - Kay J.M., Nedderman R.M., "An Introduction to Fluid Mechanics and Heat Transfer", Cambridge University Press, Cambridge (1974).
- 29 - Khang S., Kothari S.P., Chem. Eng. Sci., 35, 2203 (1980).
- 30 - King D.F., Tese de Doutorado, Universidade de Cambridge, Inglaterra (1979).
- 31 - King D.F., Harrison D., Trans. I. Chem. Eng., 60, 26 (1982).

- 32 - König B., Bucholz R., Lücke J., Schügerl, Ger. Chem. Eng., 1, 199 (1978).
- 33 - Layzer D., Astrophys. J., 122, 1 (1955).
- 34 - Lockett M.J., Davidson J.F., Harrison D., Chem. Eng. Sci., 22, 1059 (1967).
- 35 - Matsen J.H., Hovmand S., Davidson J.F., Chem. Eng. Sci., 24, 1743 (1969).
- 36 - Maxworthy T., J. Fluid Mech., 27 (2), 367 (1967).
- 37 - Moissis R., Griffith P., J. Heat Transfer, Trans. ASME (series C), 84, 29 (1962).
- 38 - Nicklin D.J., Wilkes J.O., Davidson J.F., Trans. Instr. Chem. Engrs., 40, 61 (1962).
- 39 - Riquarts H.P., Ger. Chem. Eng., 4, 18 (1981).
- 40 - Schlichting H., "Boundary Layer Theory", McGraw-Hill Company, New York (1966).
- 41 - Shah Y.T., Kelkar B.G., Godbole S.P., Deckwer W.D., AIChE J., 28 (3), 353 (1982).

- 42 - Szymanski P., J. Math. Pures et Appliquées (series 9), 11, 67 (1932).
- 43 - Taylor G., Proc. Roy. Soc., A 219, 186 (1953).
- 44 - Taylor G., Proc. Roy. Soc., A 225, 473 (1954 a).
- 45 - Taylor G., Proc. Roy. Soc., B 67, 857 (1954 b).
- 46 - Toomey R.D., Johnstone H.F., Chem. Eng. Prog., 48, 220 (1952).
- 47 - Ulbrecht J., Baykara Z.S., Chem. Eng. Commun., 10, 165 (1981).
- 48 - White E.T., Beardmore R.H., Chem. Eng. Sci., 17, 351 (1962).

FIGURAS

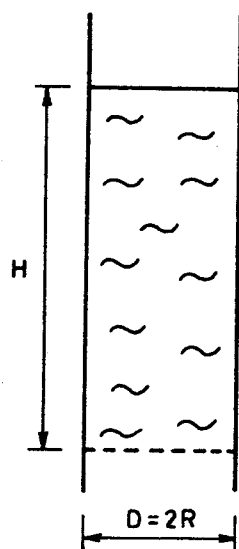


Figura 2.1 - Representação esquemática de uma coluna de líquido.

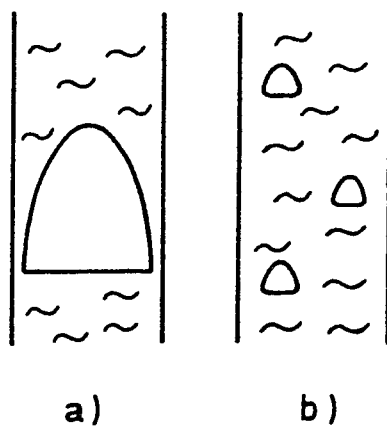


Figura 2.2 - Representação esquemática de bolhas: a) bolha tubular ('slug') ($d_e \geq D$); b) bolhas ($d_e < D$).

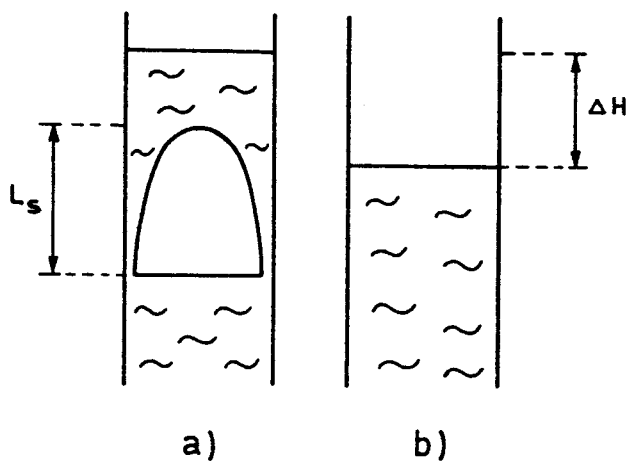


Figura 2.3 - Altura de líquido deslocado pelo "slug" (ΔH):
a) "slug" perto da superfície livre; b) após erupção do "slug" à superfície.

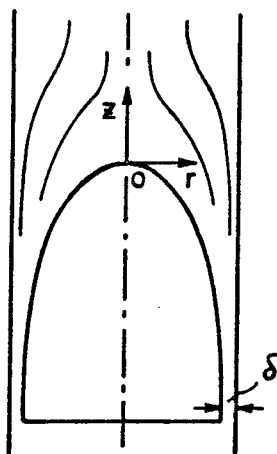


Figura 2.4 - Representação de um referencial de coordenadas "preso" ao "slug".

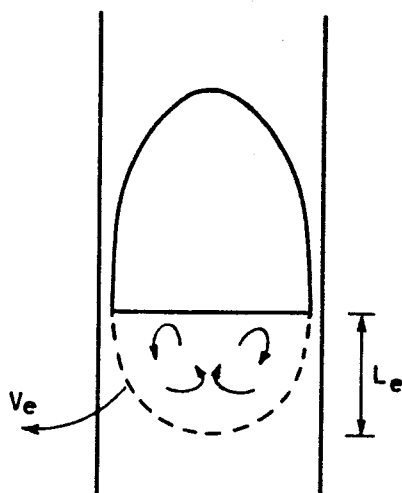


Figura 2.5 - Representação esquemática da esteira de um "slug".

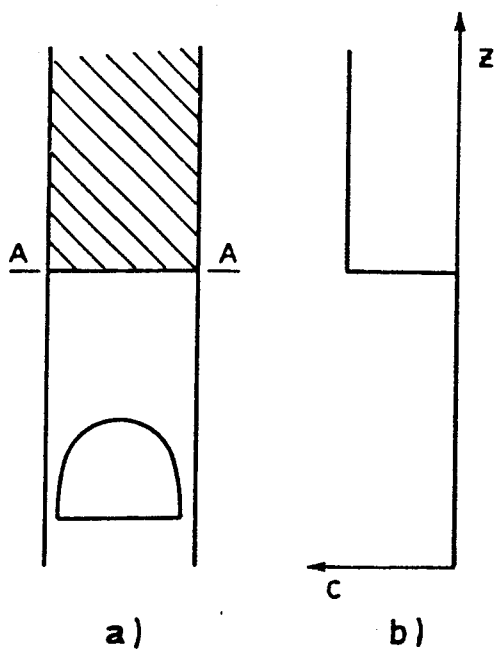


Figura 2.6 - a) Distribuição de soluto antes da passagem do "slug" pelo plano AA; b) Perfil de concentração antes da passagem do "slug" pelo plano AA.

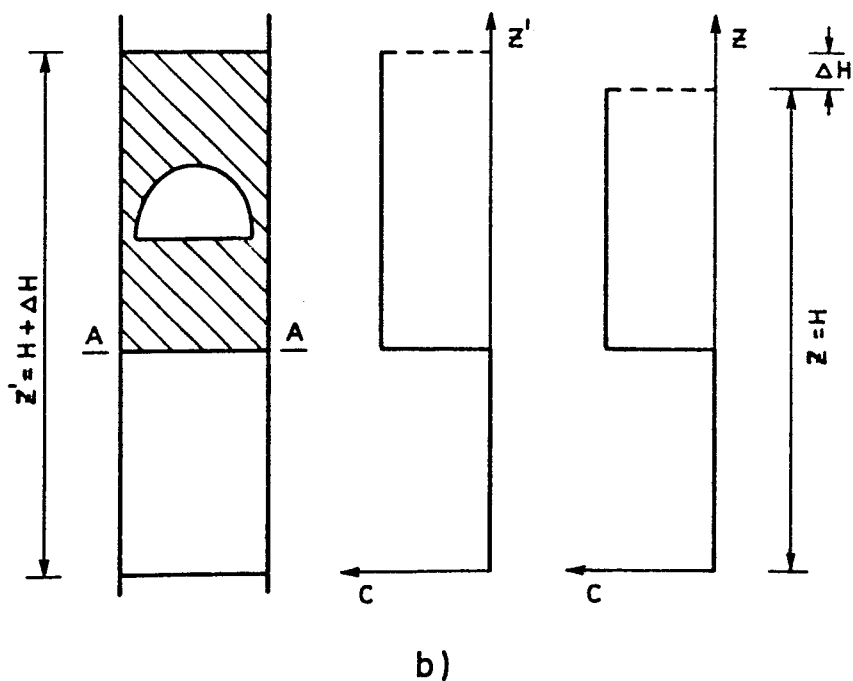
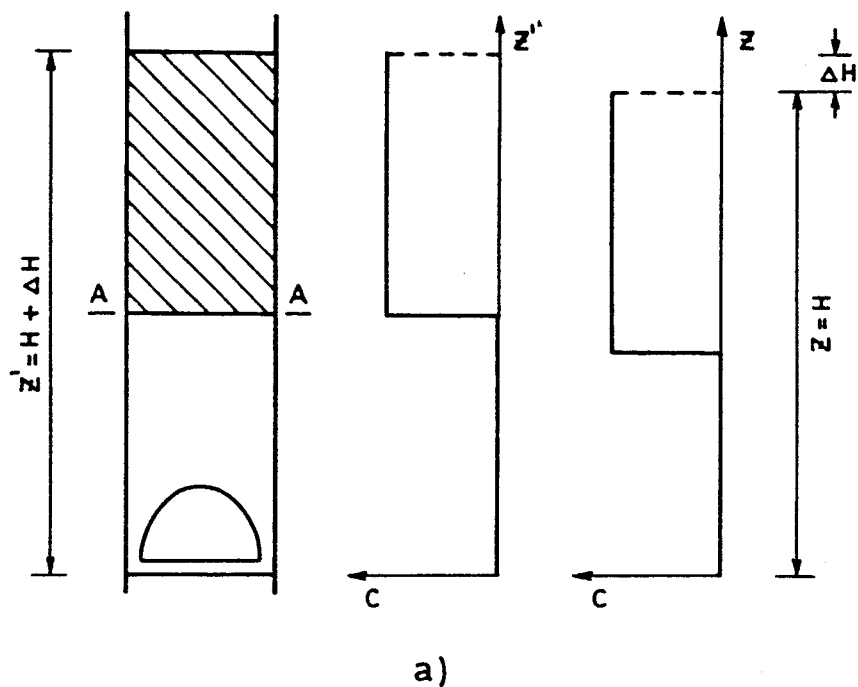


Figura 2.7 - Representação esquemática da correcção ao volume da coluna ocupada pelo gás: a) antes da passagem do "slug" pelo plano AA; b) após a passagem do "slug" pelo plano AA se não houvesse qualquer mistura.

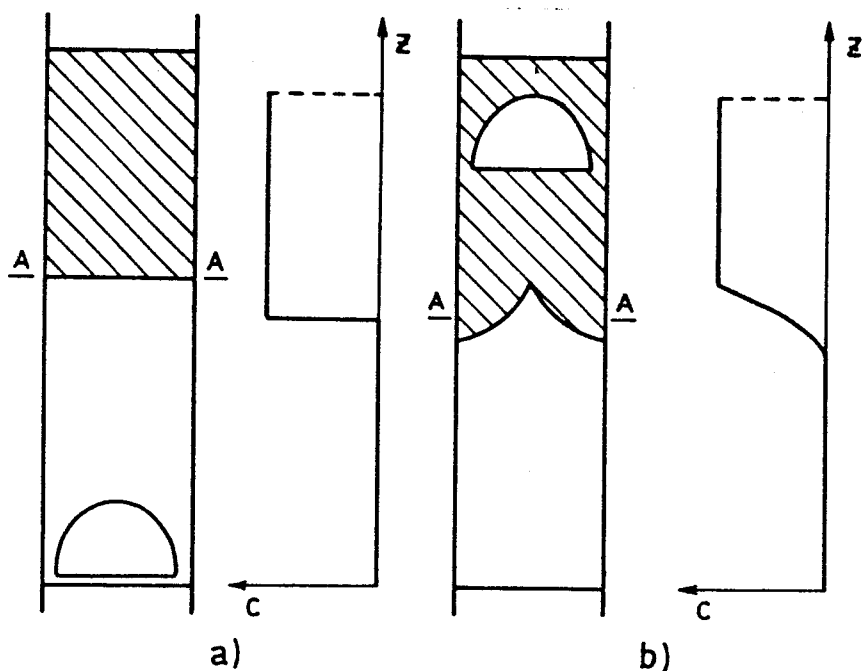


Figura 2.8 - Distribuição de soluto e respectivo perfil de concentração longitudinal supondo que não há mistura radial: a) antes da passagem do "slug" pelo plano AA; b) após a passagem do "slug" pelo plano AA.

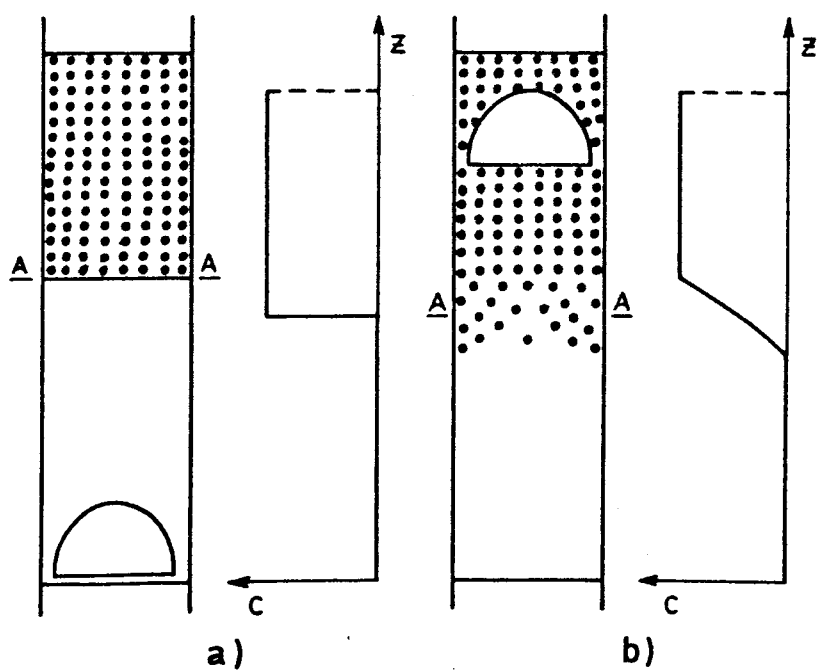


Figura 2.9 - Distribuição de soluto e respectivo perfil de concentração longitudinal supondo mistura radial incompleta: a) antes da passagem do "slug" pelo plano AA; b) após a passagem do "slug" pelo plano AA.

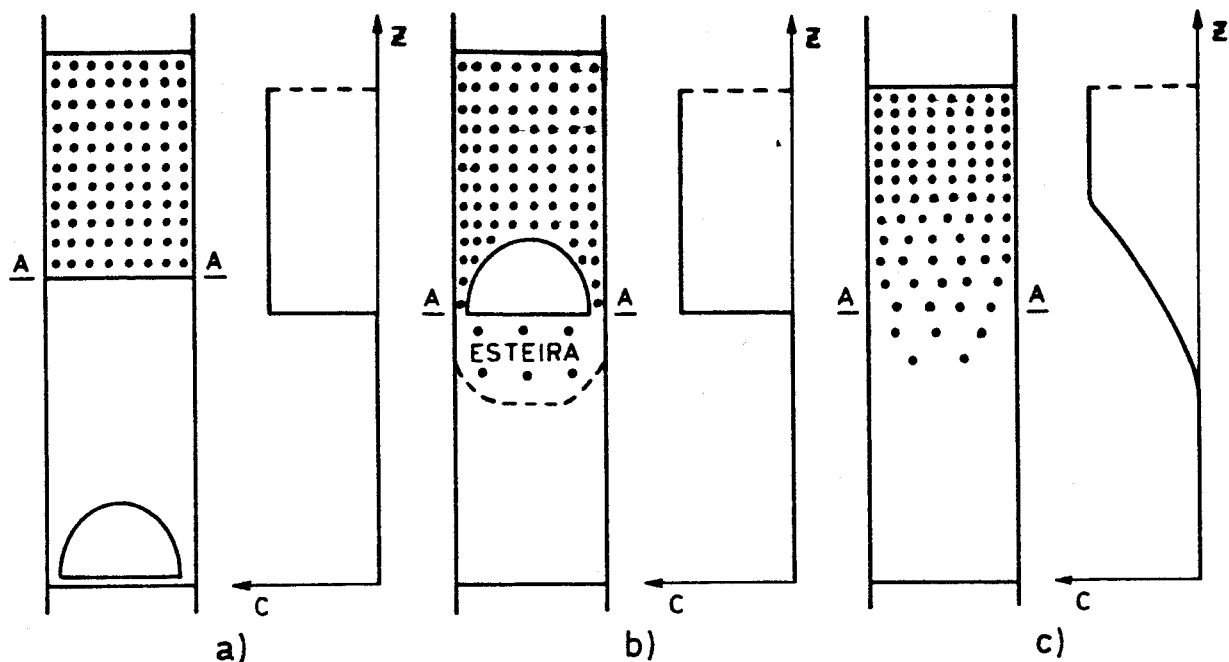


Figura 2.12 - Distribuição de soluto e respectivo perfil de concentração longitudinal devido ao escoamento na região da esteira: a) antes da passagem do "slug" pelo plano AA ; b) no instante em que o base do "slug" passa pelo plano AA ; c) após passagem do "slug" pelo plano AA .

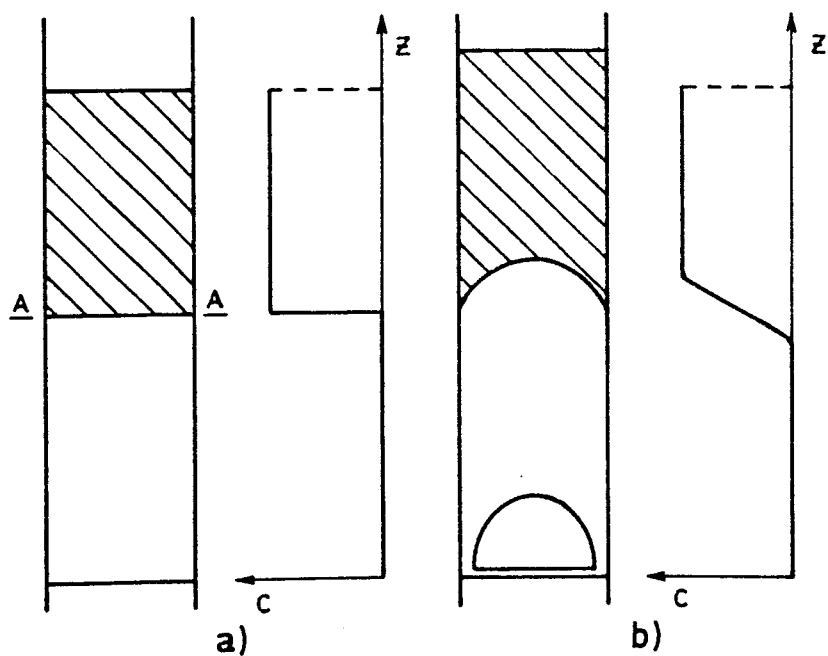


Figura 2.13 - a) Distribuição de soluto e respectivo perfil de concentração longitudinal antes da injeção do "slug"; b) Distribuição de soluto e respectivo perfil de concentração longitudinal após a injeção do "slug".

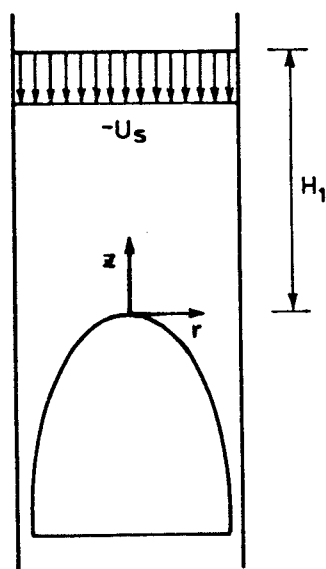


Figura 3.1 - Perfil de velocidade, relativamente ao "slug", numa secção recta de fluído, $z = H_1$, situada para $t = t_0$ longe da zona frontal do "slug".

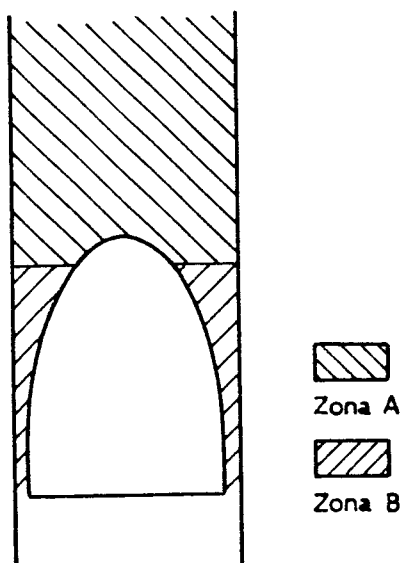


Figura 3.2 - Representação esquemática das zonas frontal e lateral do "slug".

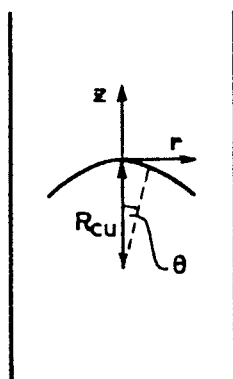


Figura 3.3 - Raio de curvatura da zona frontal do "slug".

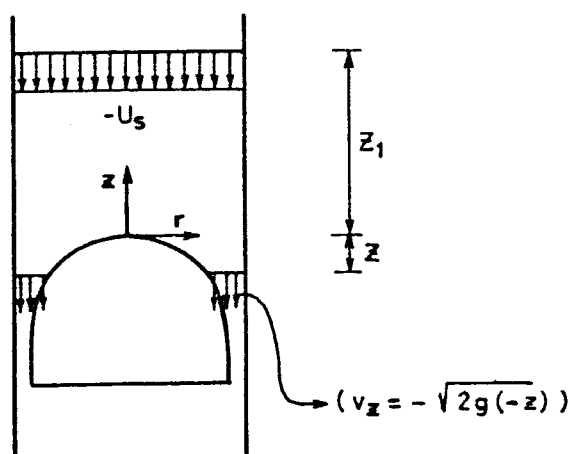


Figura 3.4 - Perfis de velocidade, segundo Dumitrescu, nos planos de cota $z_1 > 0$ e $z < 0$.

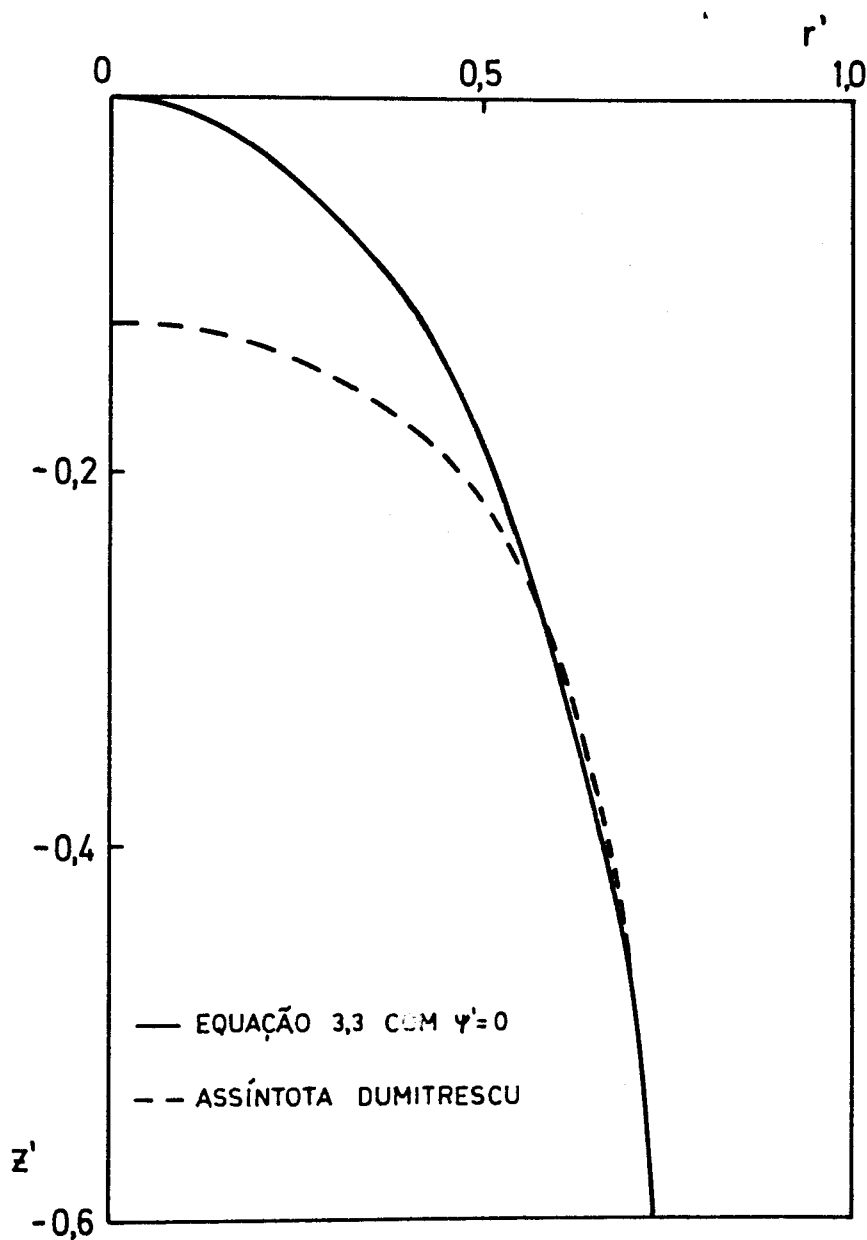


Figura 3.5 - Representação da superfície frontal do "slug", tomando $R_{cu}/R = 0,759$; as duas curvas são tangentes no ponto $(r' = 0,7357, z' = -0,5763)$.

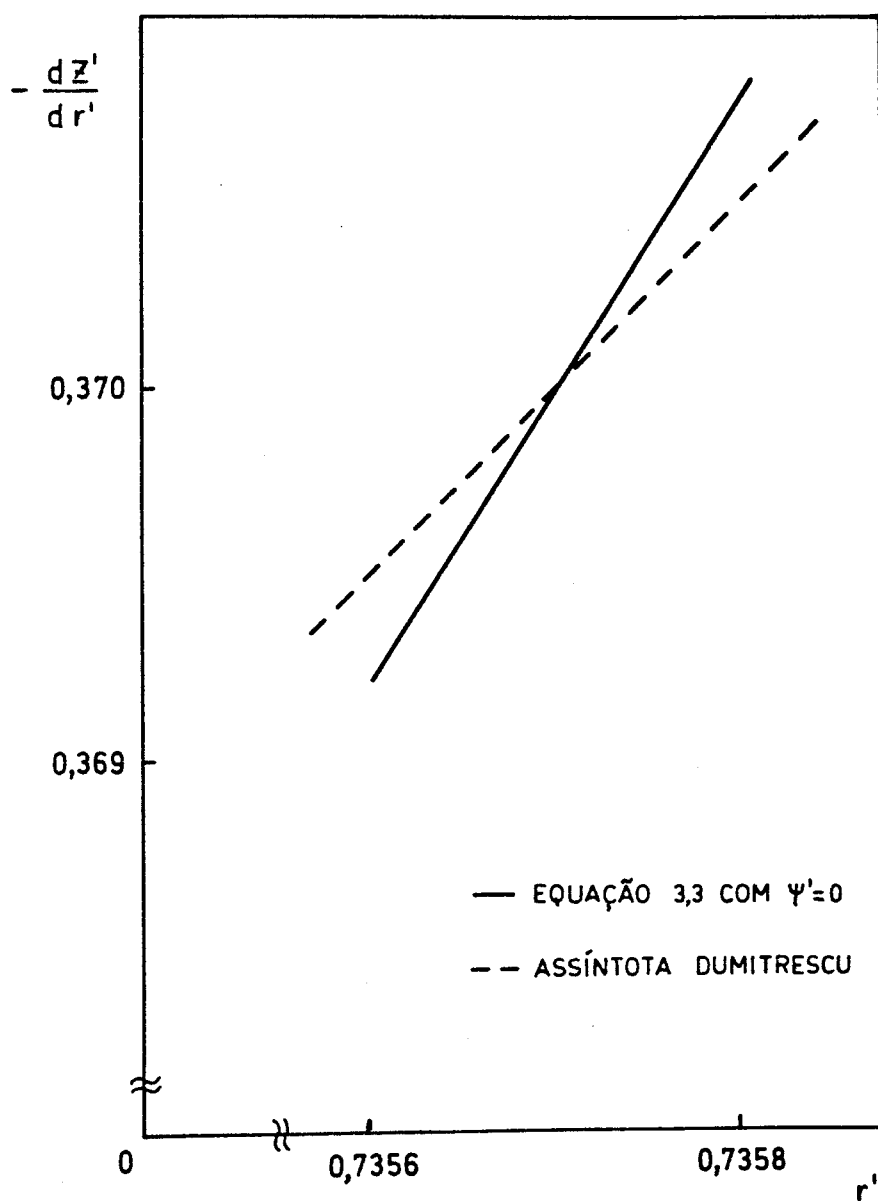


Figura 3.6 - dz'/dr' vs. r' na zona do ponto de tangência.

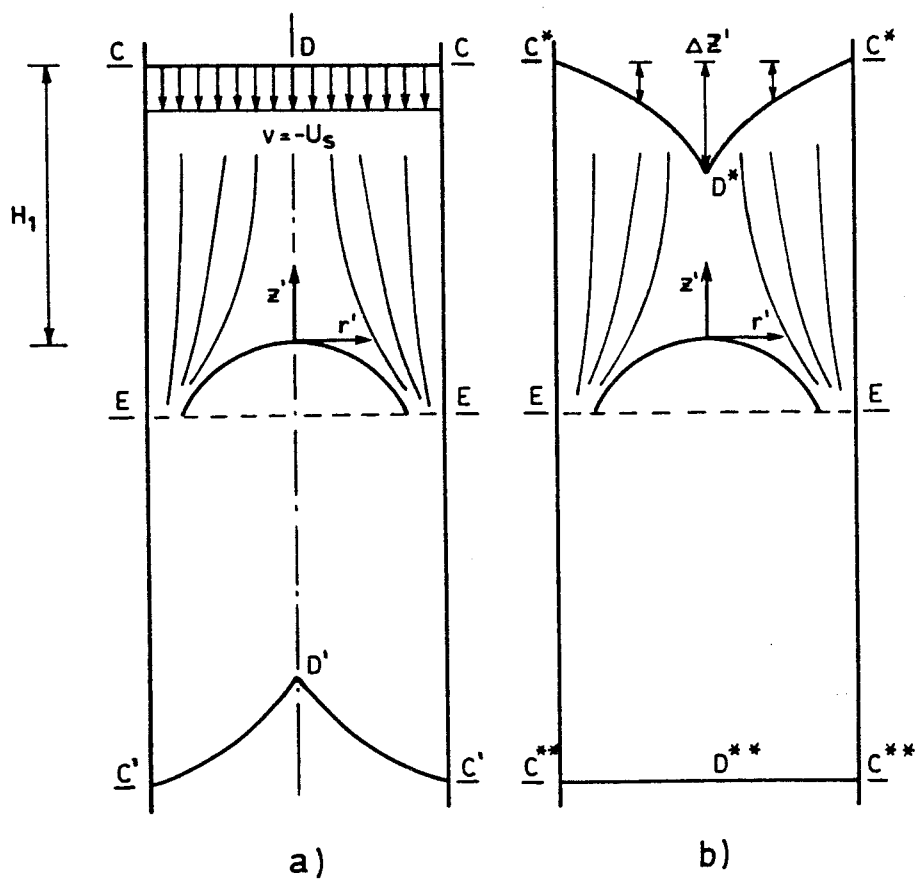
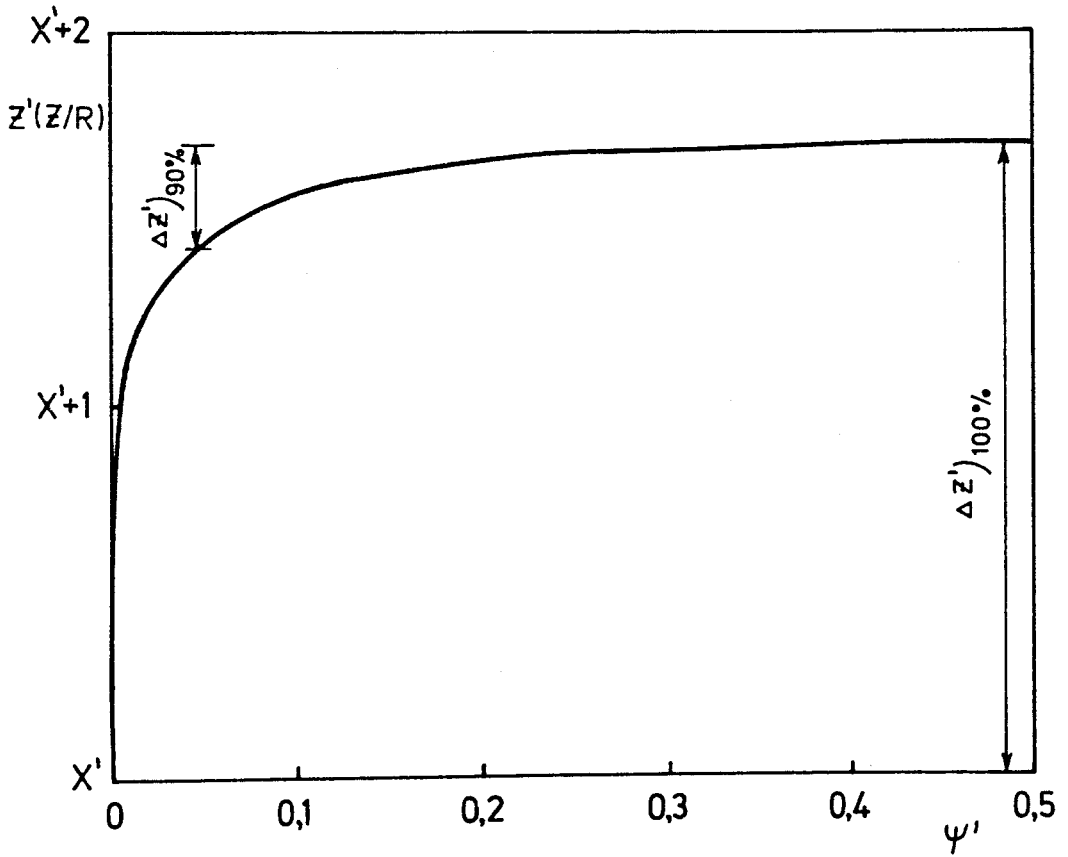
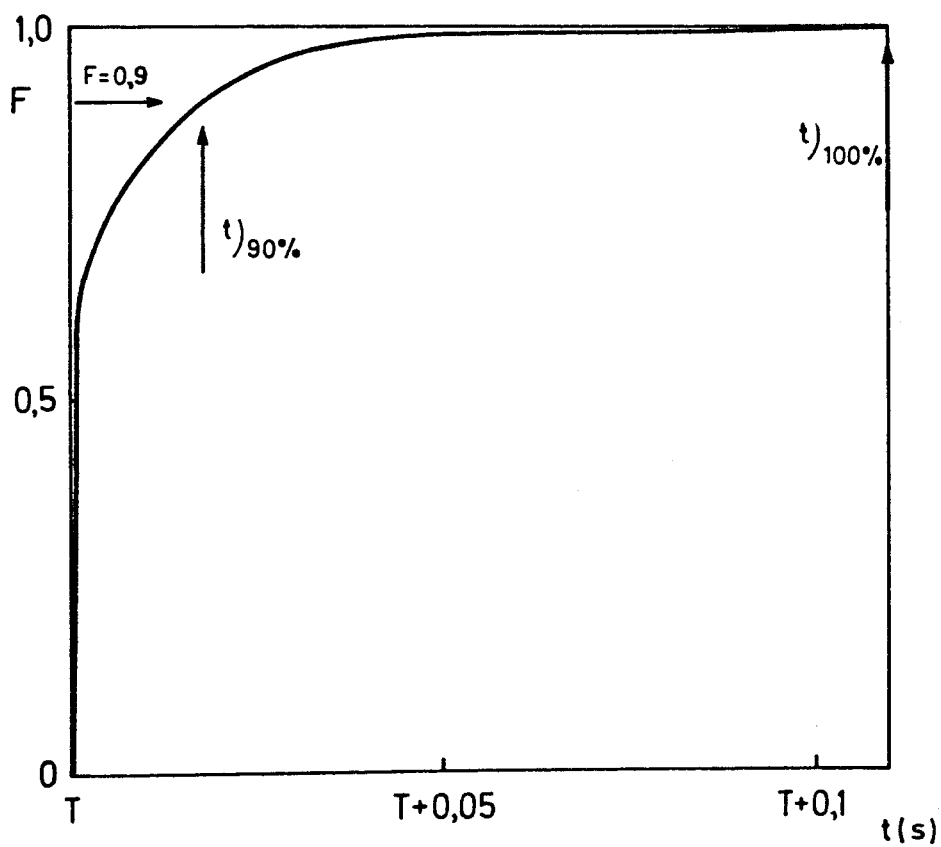


Figura 3.7 - Representação esquemática das curvas de distorção (a) e de proveniência (b) para a zona frontal do "slug".



$X'(X' = \frac{X}{R})$ - COTA DA PROVENIÊNCIA DO ELEMENTO
MAIS LENTO ($\psi' \approx 0$) ($X \geq 3$)

Figura 3.8 - Curva de proveniência para a zona frontal do "slug";
 $\psi' = 0$ eixo da coluna, $\psi' = 0,5$ parede da coluna.



T - TEMPO DE RESIDÊNCIA DO ELEMENTO
MAIS RÁPIDO ($\Psi' = 0,5$)

Figuras 3.9 - Curva $F(t)$ para a zona frontal do "slug".

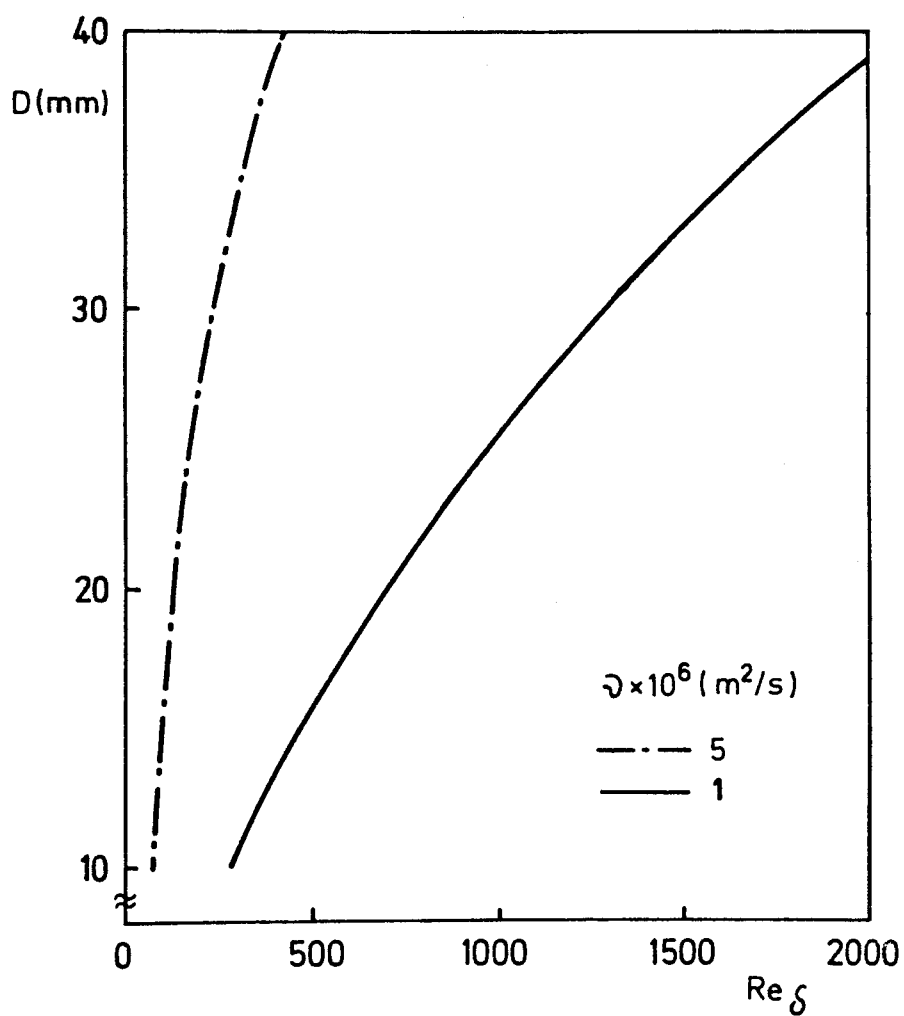


Figura 3.11 - Reynolds na película de líquido em função do diâmetro da coluna.

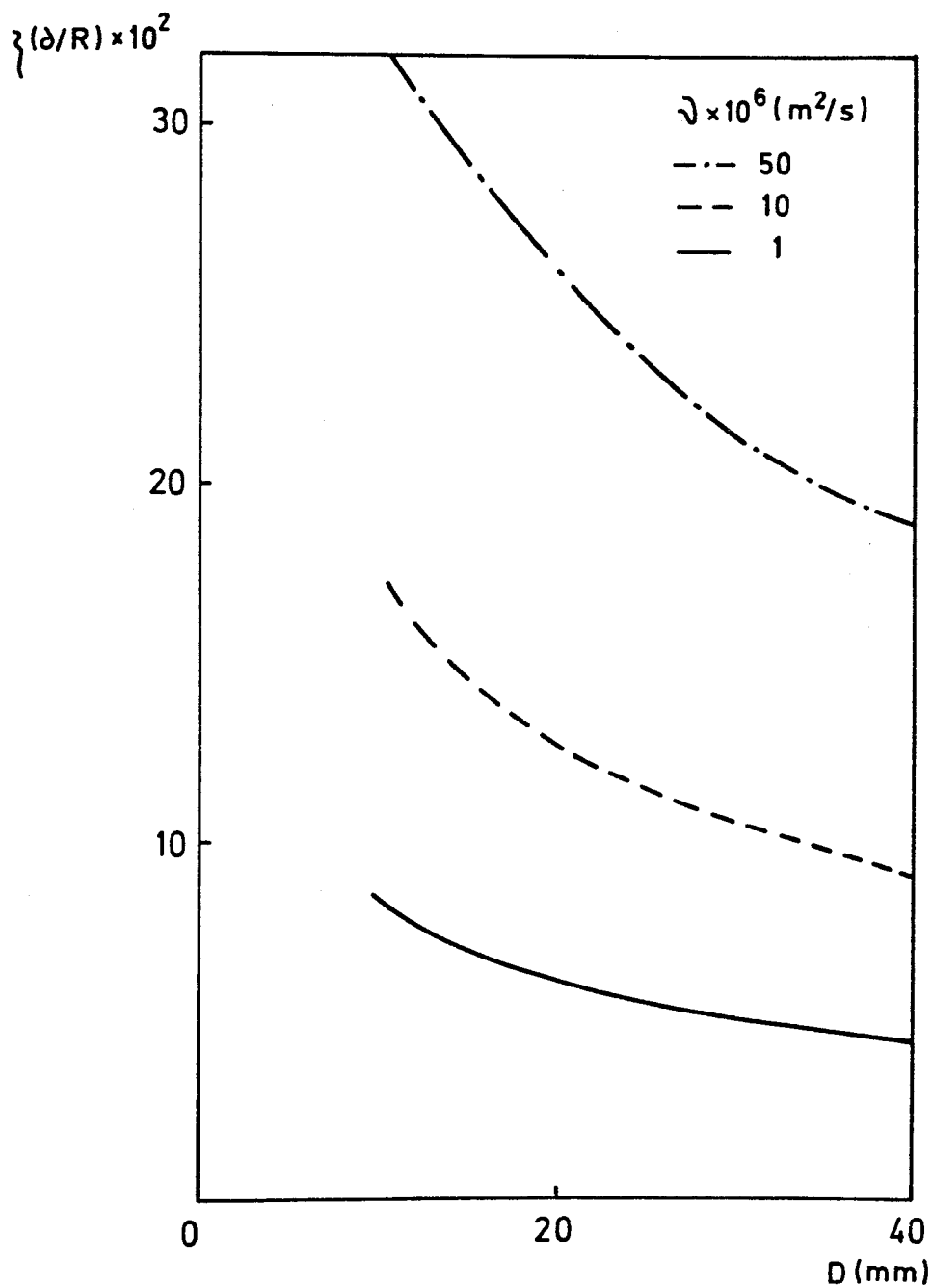


Figura 3.12 - Espessura da película de líquido ($\xi = \delta/R$) em função do diâmetro da coluna.

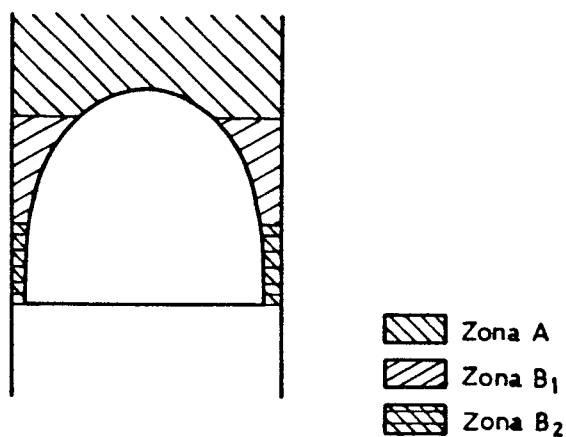


Figura 3.13 - Sub-divisão da zona lateral do "slug"; zona de espessura limite (B₂), zona intermêdia (B₁).

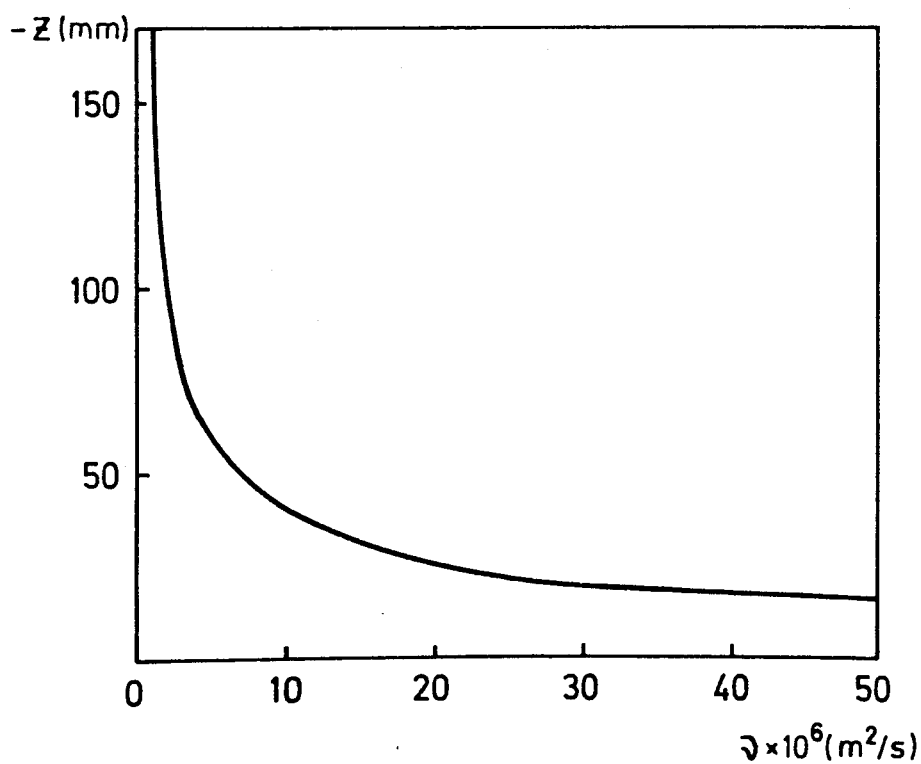


Figura 3.14 - Coordenada axial para a qual a coluna de líquido atinge a sua espessura limite, em função da viscosidade do líquido: $D = 19$ mm.

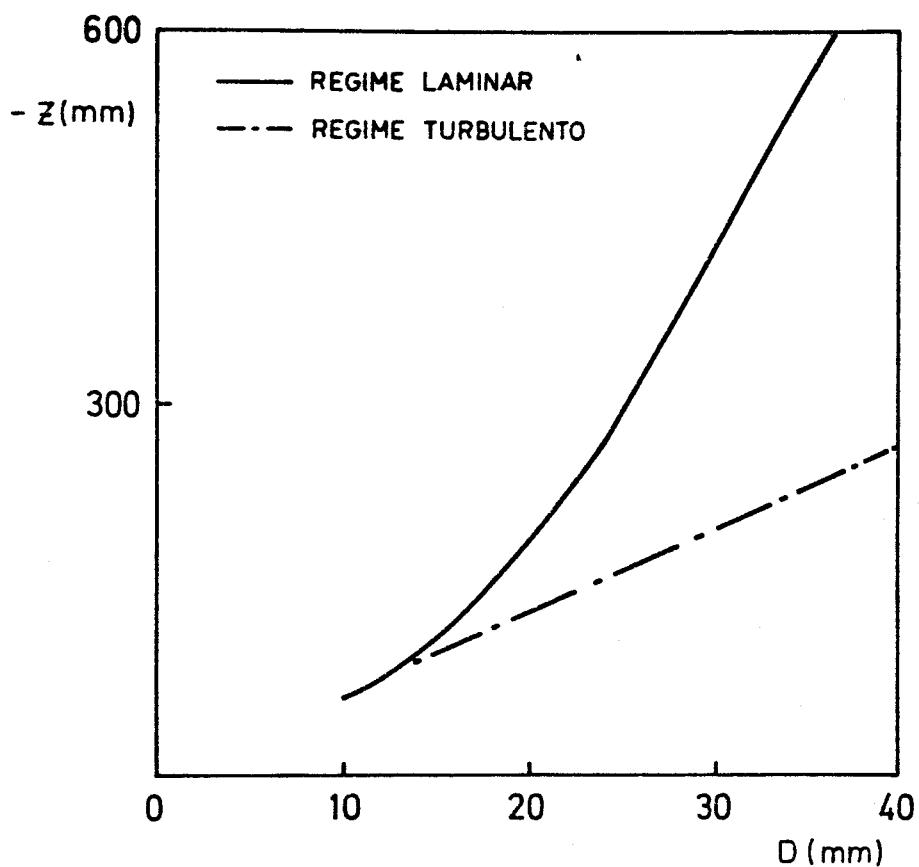


Figura 3.15 - Coordenada axial para a qual a película de líquido atinge a sua espessura limite em função do diâmetro da coluna; $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

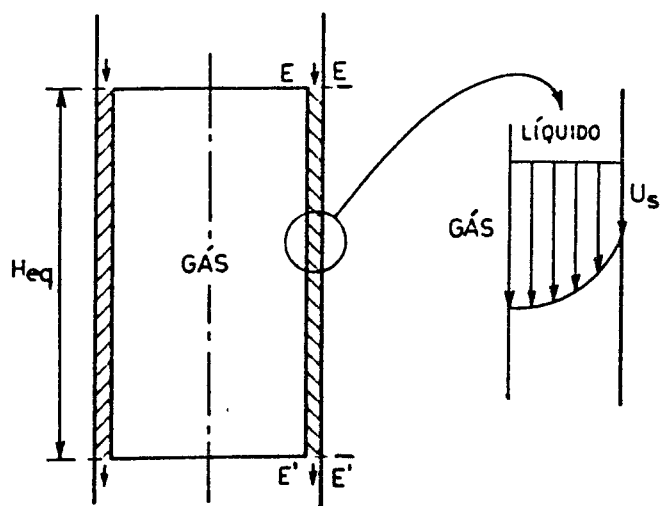
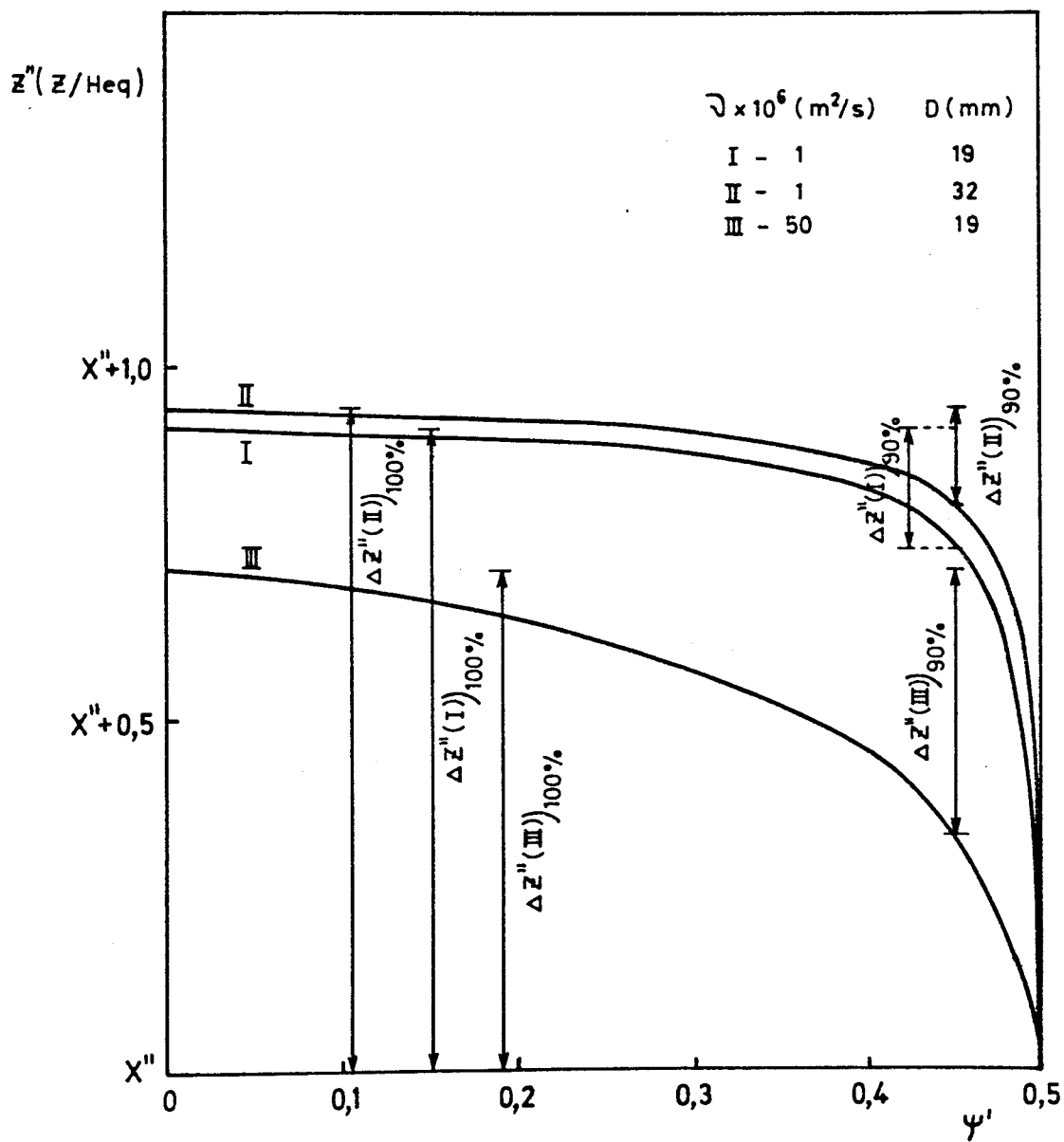
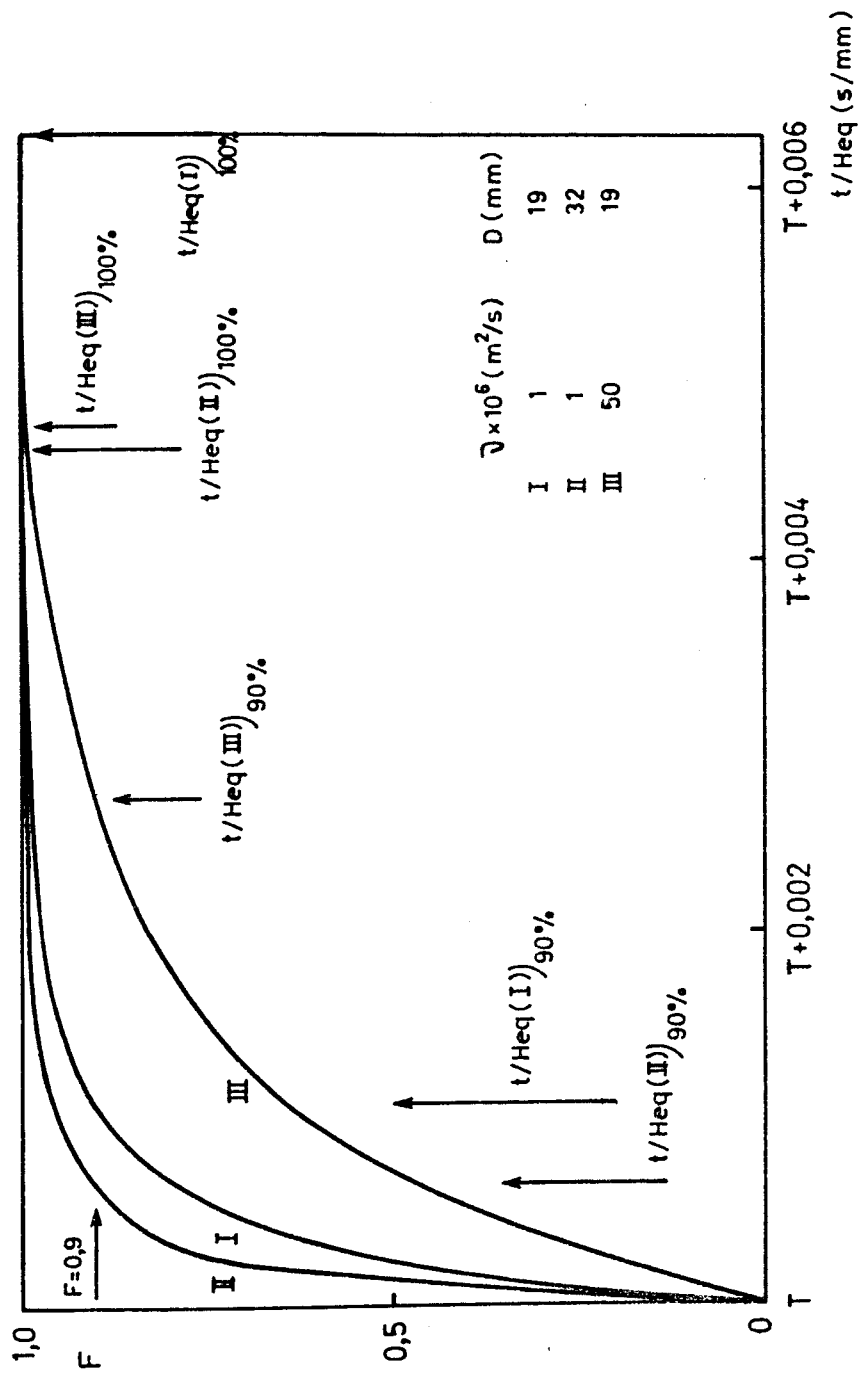


Figura 3.16 - Perfil de velocidade, ampliado, na zona lateral tomando como referencial o "slug".



$X \left(X'' = \frac{X}{Heq} \right)$ COTA DE PROVENIÊNCIA DO
ELEMENTO MAIS LENTO ($\psi' = 0,5$)

Figura 3.17 - Curva de proveniência para a zona lateral do "slug";
 $\psi' = 0$ eixo da coluna, $\psi' = 0,5$ parede da coluna.



T - TEMPO DE RESIDÊNCIA DO ELEMENTO MAIS RÁPIDO ($\psi' = 0$)

Figura 3.18 - Curva $F(t/t_{eq})$ para a zona lateral do "slug".

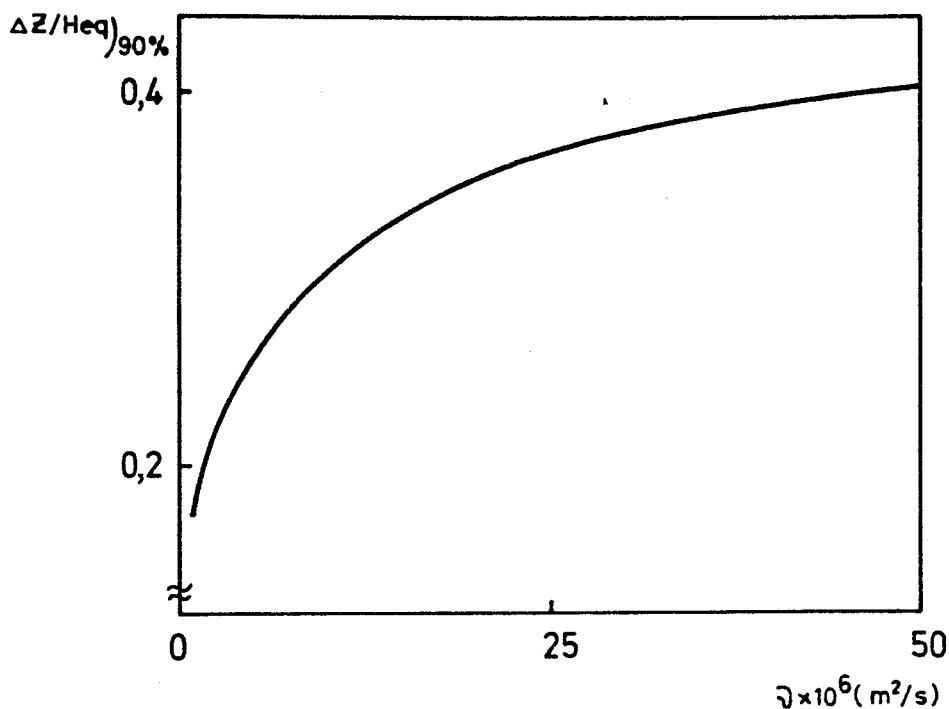


Figura 3.19 - Gama de proveniência ($\Delta z/H_{eq}$) de 90% dos elementos, zona lateral do "slug", em função da viscosidade do líquido; $D = 19$ mm.

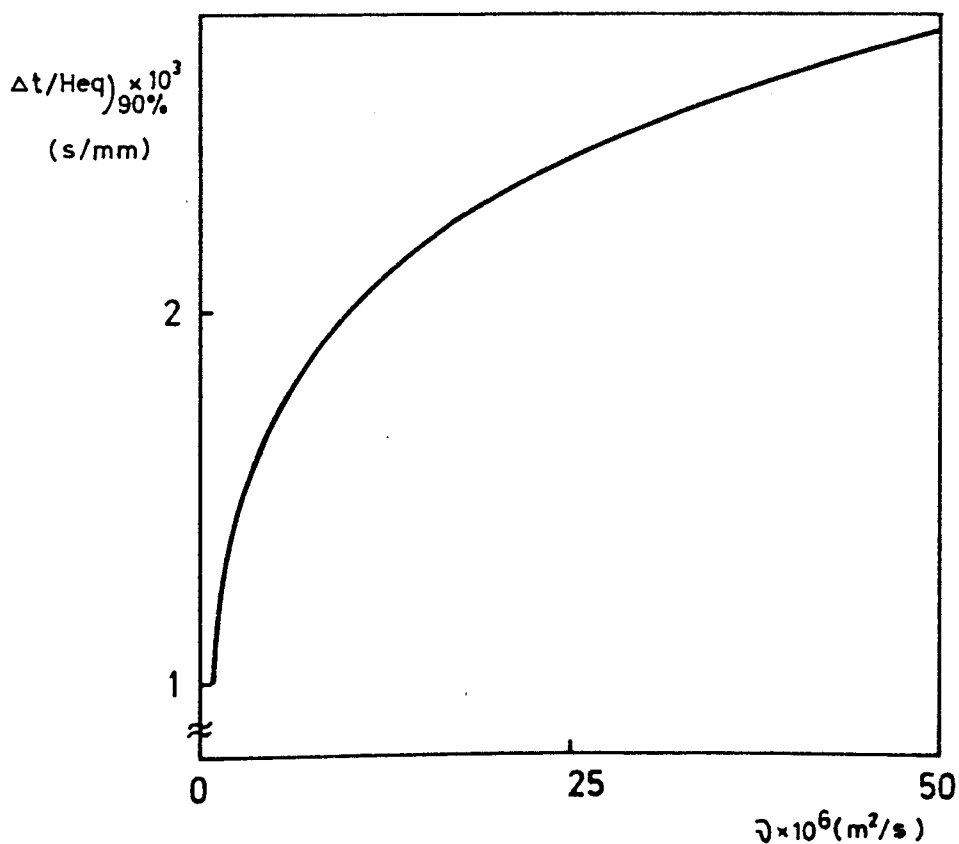


Figura 3.20 - Atraso ($\Delta t/H_{eq}$) sofrido por 90% dos elementos, zona lateral do "slug", em função da viscosidade do líquido; $D = 19$ mm.

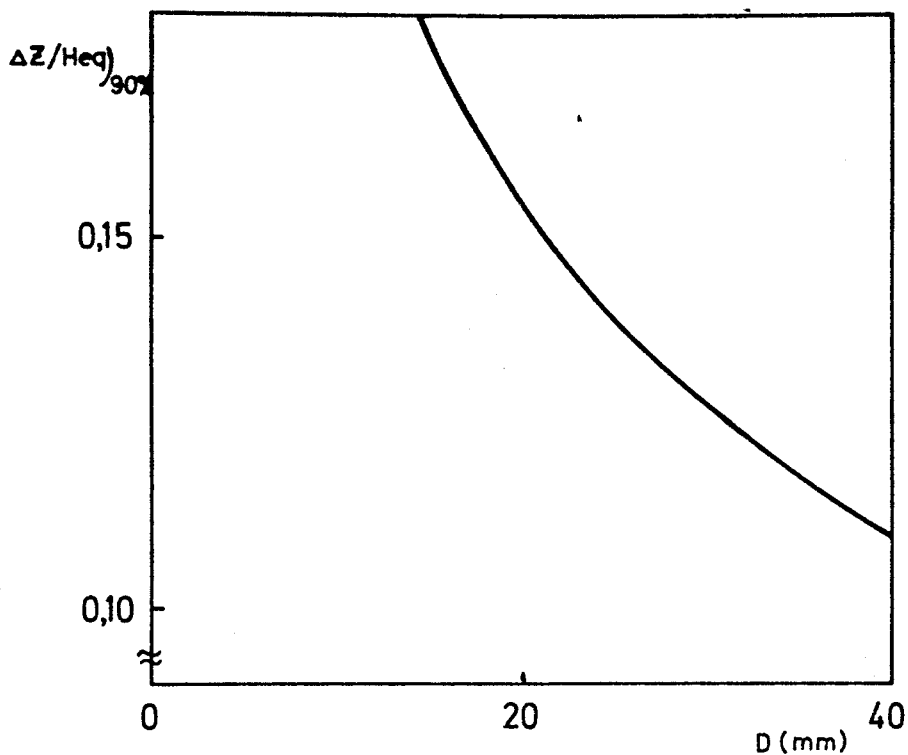


Figura 3.21 - Gama de proveniência ($\Delta z/H_{eq}$) de 90% dos elementos, zona lateral do "slug", em função do diâmetro da coluna; $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

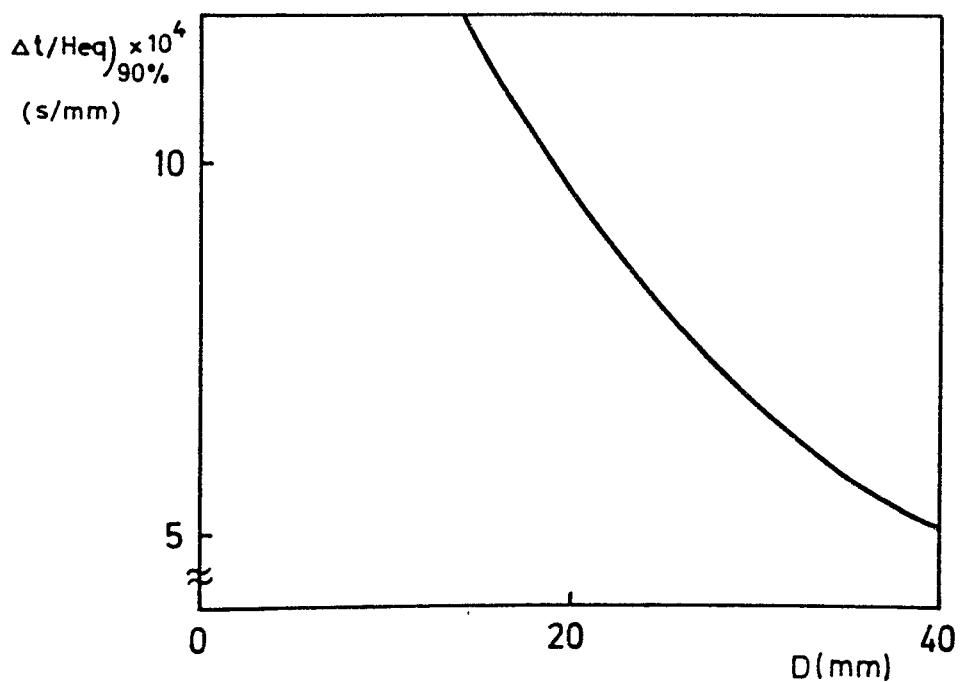
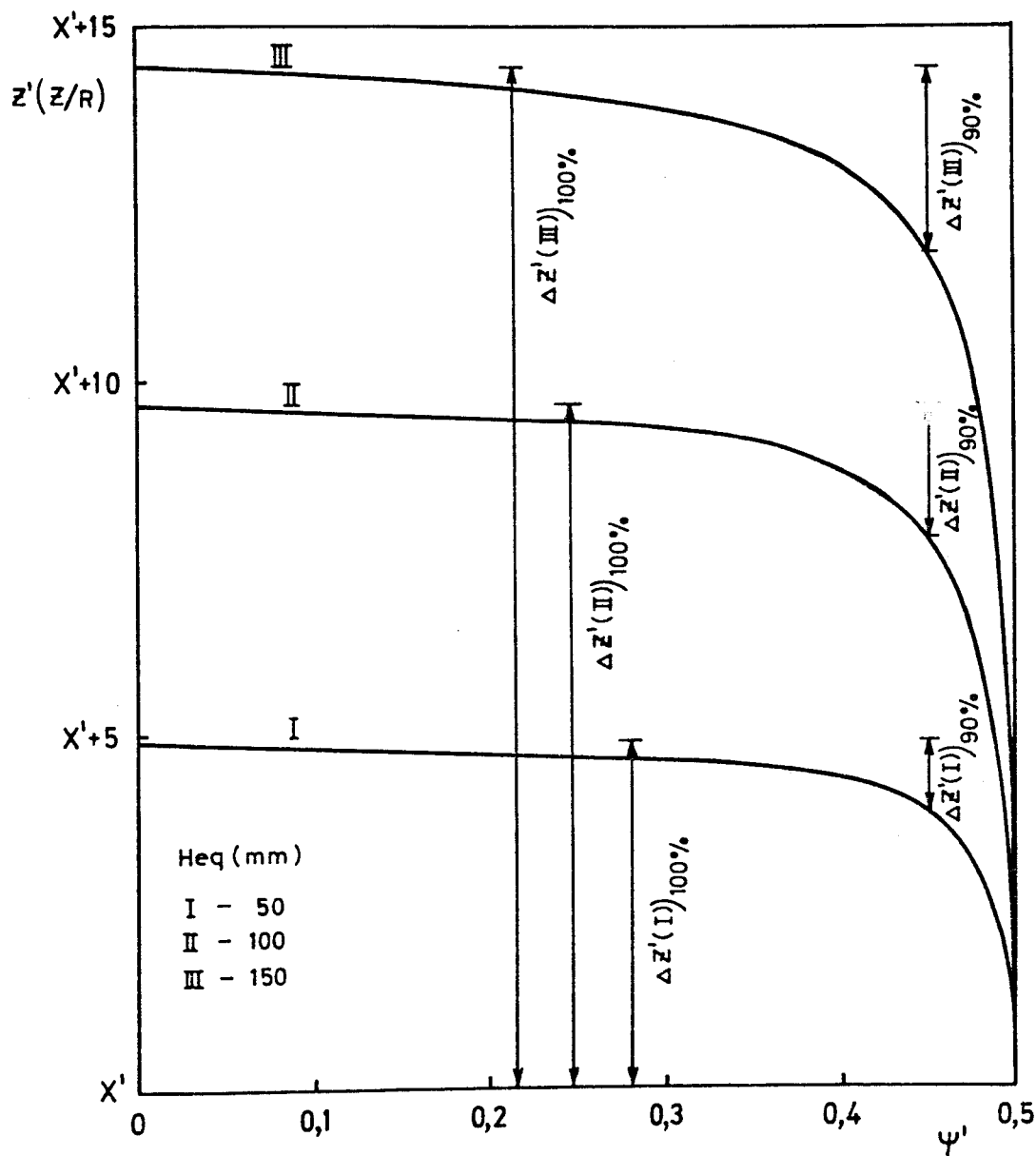
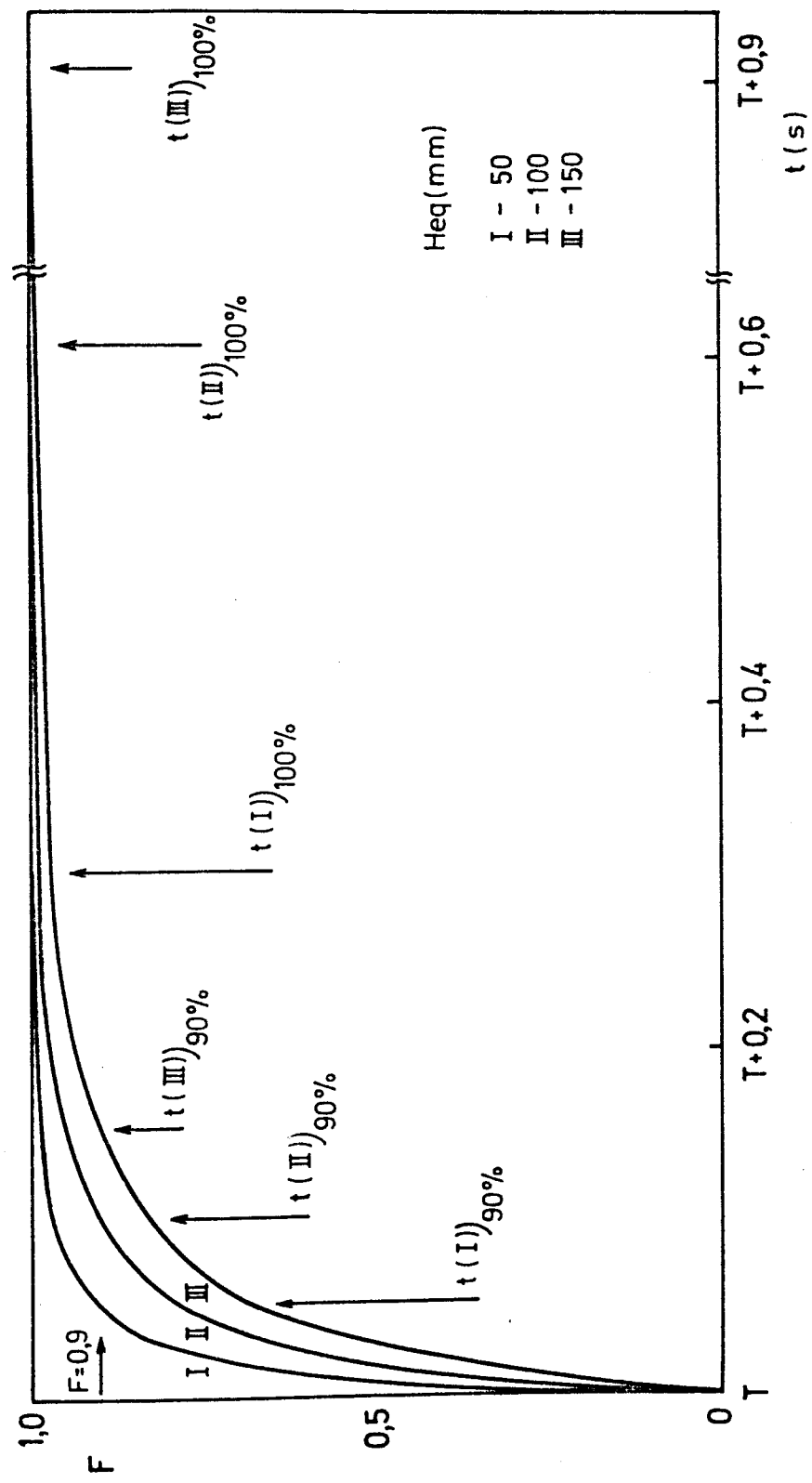


Figura 3.22 - Atraso ($\Delta t/H_{eq}$) sofrido por 90% dos elementos, zona lateral do "slug", em função do diâmetro da coluna; $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.



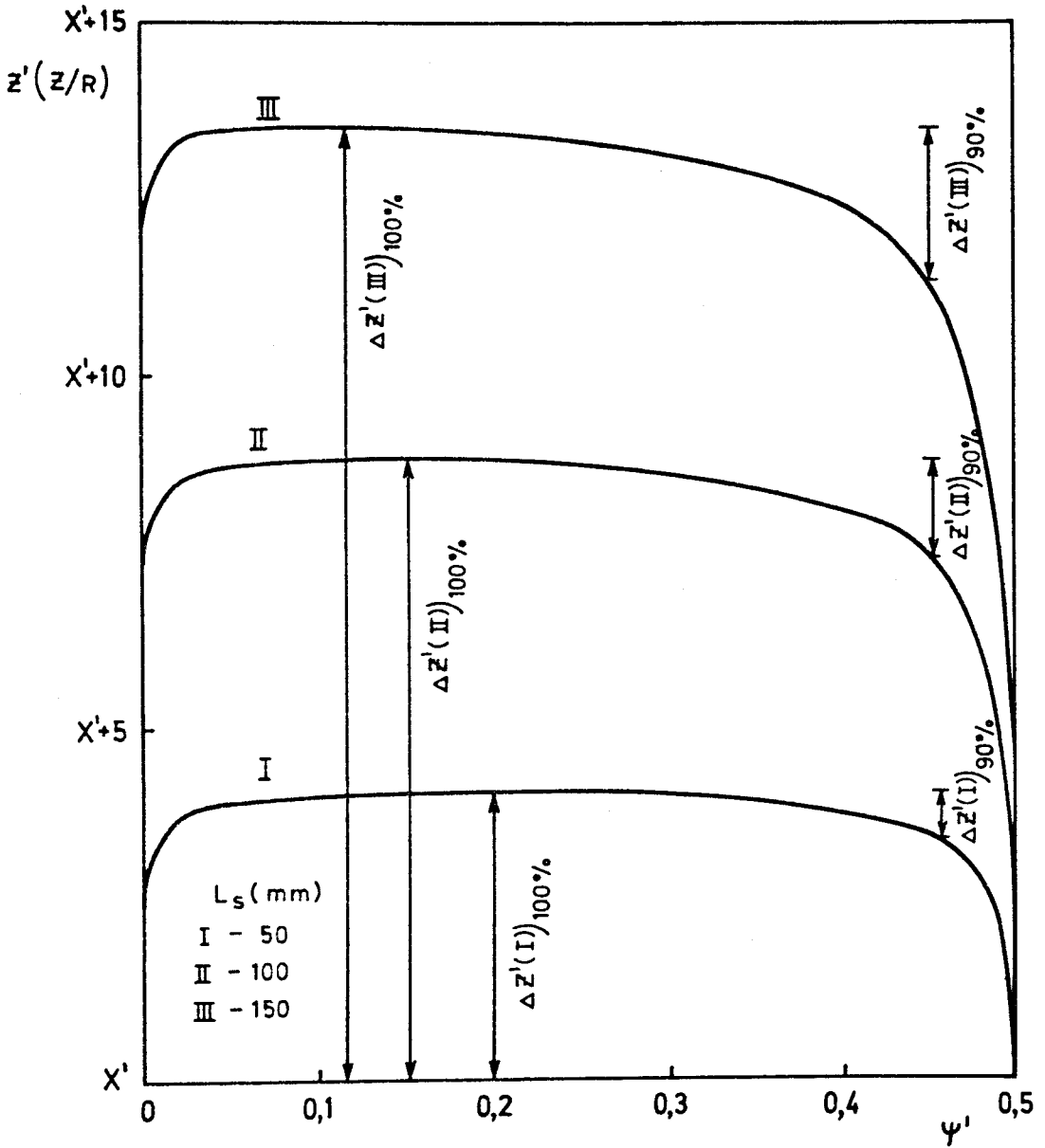
$X \left(X' = \frac{X}{R} \right)$ COTA DE PROVENIÊNCIA DO
ELEMENTO MAIS LENTO ($\psi' = 0,5$)

Figura 3.23 - Curva de proveniência, zona lateral do "slug", para $H_{eq} = 50, 100$ e 150 mm; $D = 19$ mm e $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.



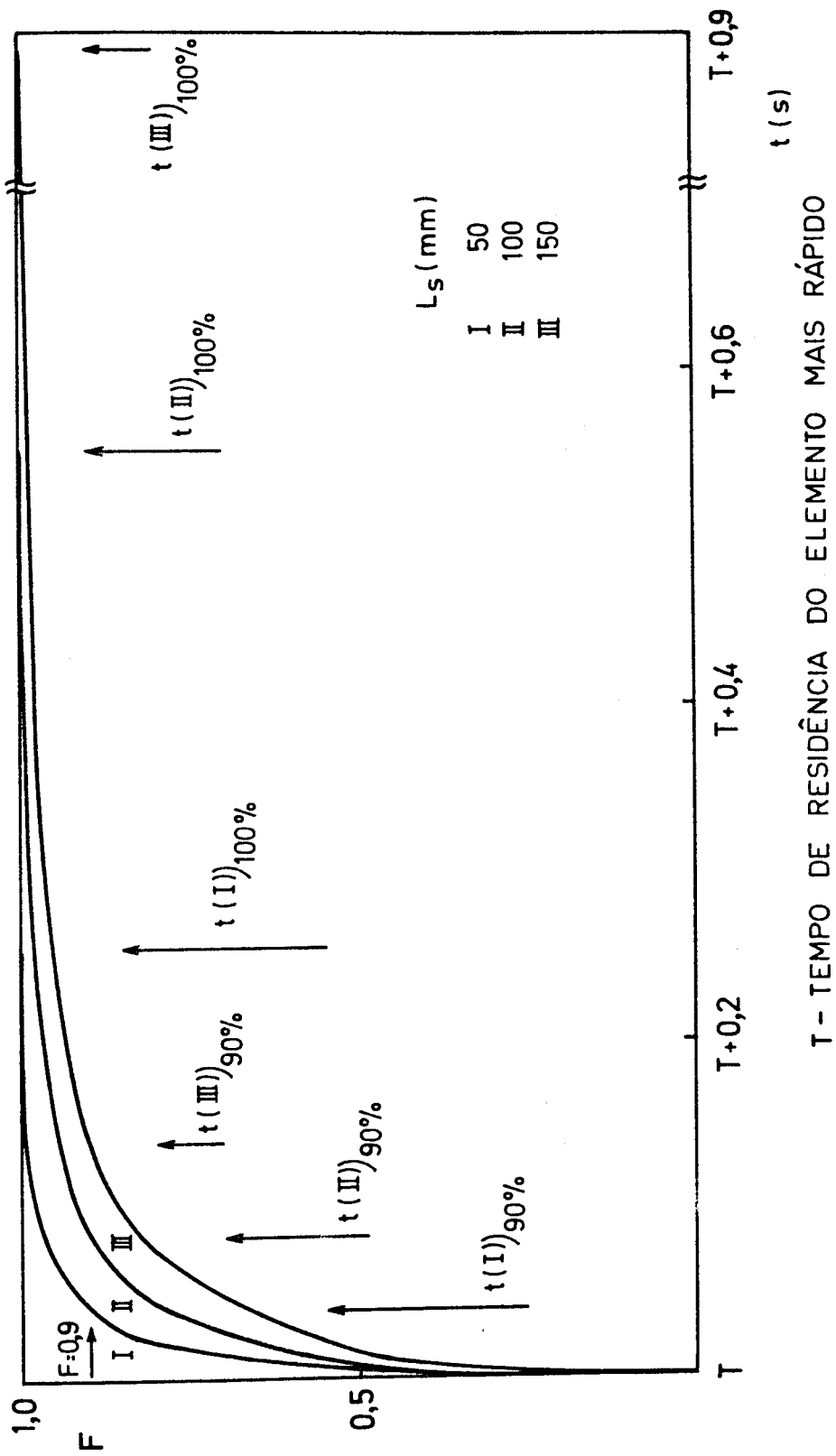
T - TEMPO DE RESIDÊNCIA DO ELEMENTO MAIS RÁPIDO ($\psi'=0$)

Figura 3.24 - Curva $F(t)$, zona lateral do "slug", para $H_{eq} = 50, 100$ e 150 mm; $D = 19$ mm e $v = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.



$X \left(X' = \frac{X}{R} \right)$ COTA DE PROVENIÊNCIA
DO ELEMENTO MAIS LENTO ($\psi' = 0,5$)

Figura 3.25 - Curva de proveniência, zona lateral + zona frontal,
para $L_s = 50, 100$ e 150 mm; $D = 19$ mm e
 $v = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.



T - TEMPO DE RESIDÊNCIA DO ELEMENTO MAIS RÁPIDO

Figura 3.26 - Curva $F(t)$, zona lateral + zona frontal, para $L_s = 50, 100$ e 150 mm; $D = 19$ mm e $v = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

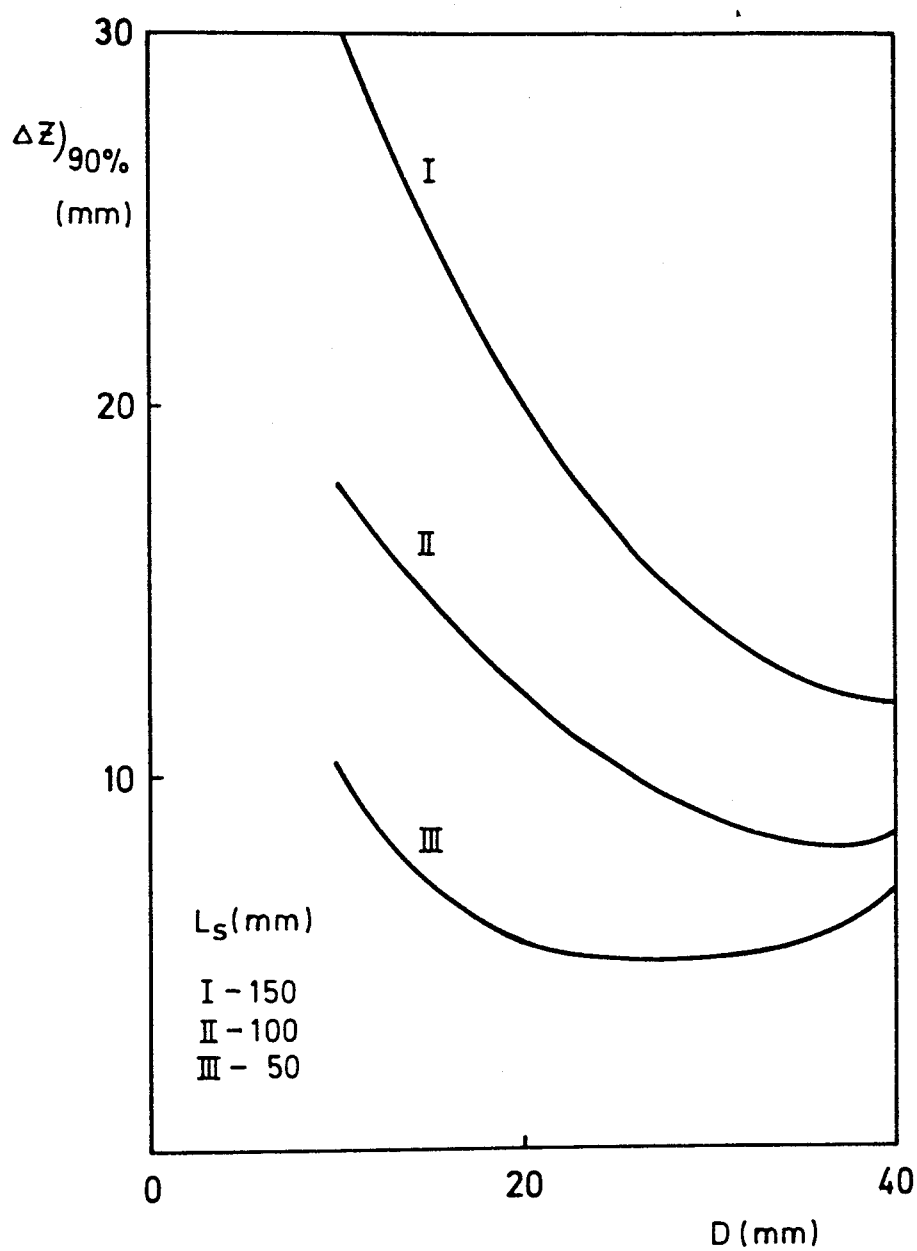
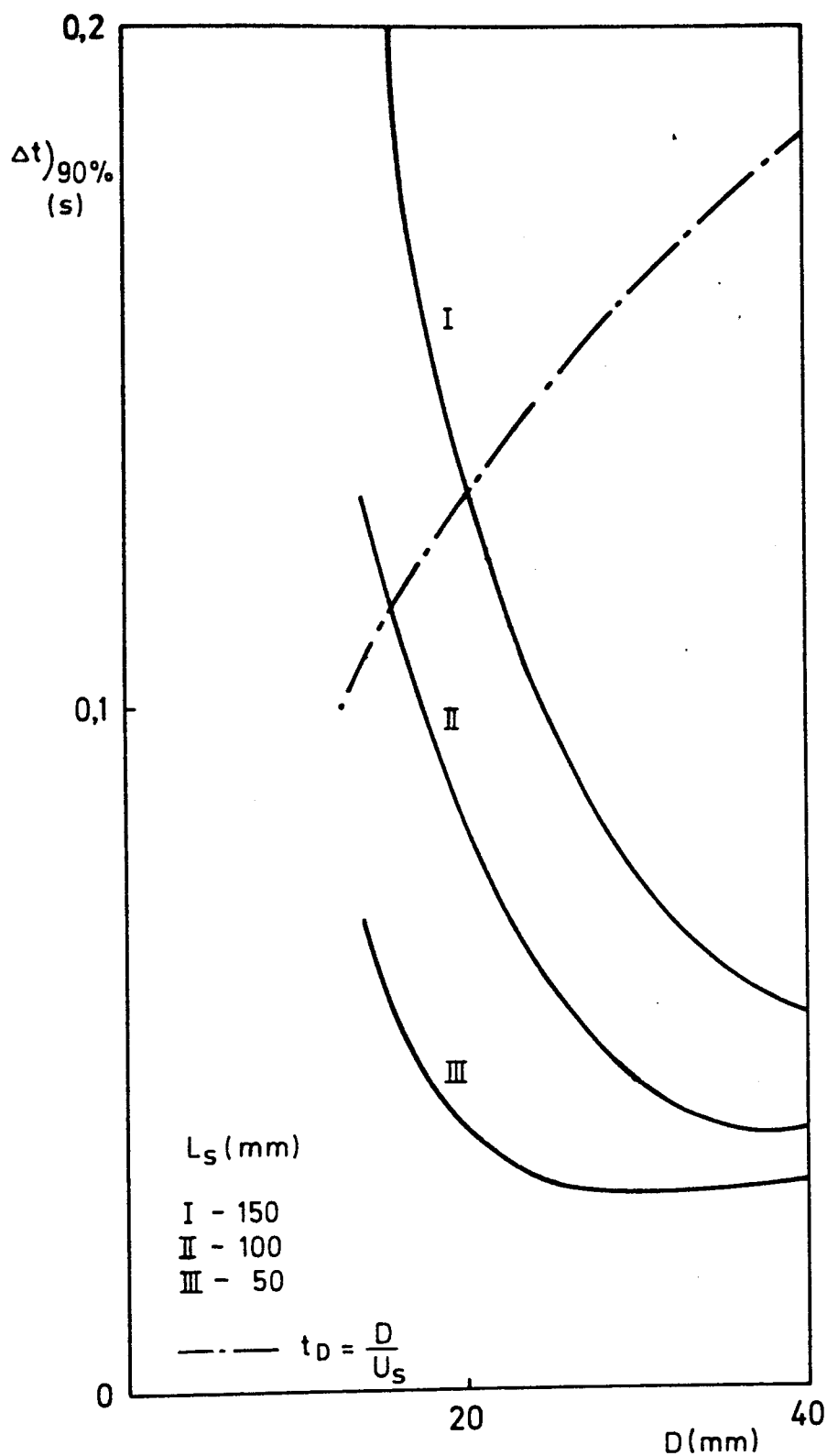


Figura 3.27 - Gama de proveniência de 90% dos elementos, zona lateral + zona frontal, em função do diâmetro da coluna; $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.



— · — TEMPO QUE UM SLUG DEMORA A PERCORRER
UM DIÂMETRO DE COLUNA, t_D

Figura 3.28 - Atraso sofrido por 90% dos elementos, zona lateral + zona frontal, em função do diâmetro da coluna; $v = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

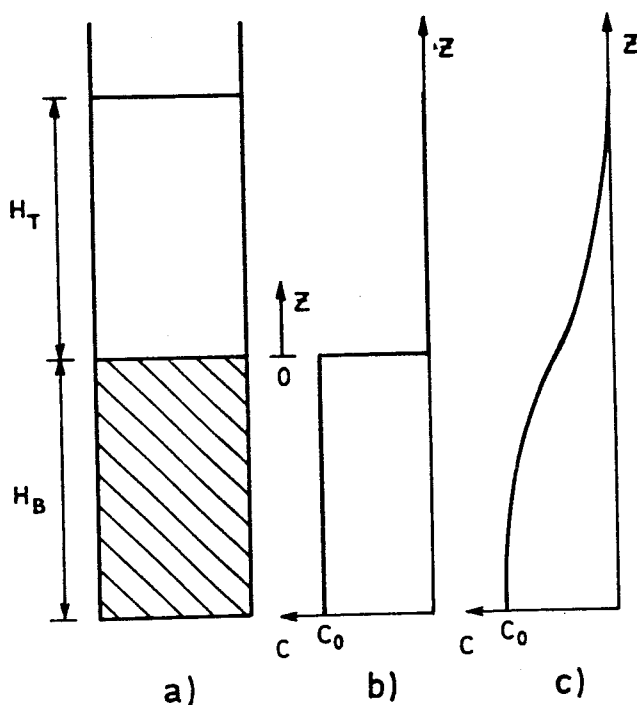


Figura 4.1 - a) Distribuição inicial de soluto na coluna; b) Perfil de concentração inicial; c) Perfil de concentração após a passagem de N "slugs".

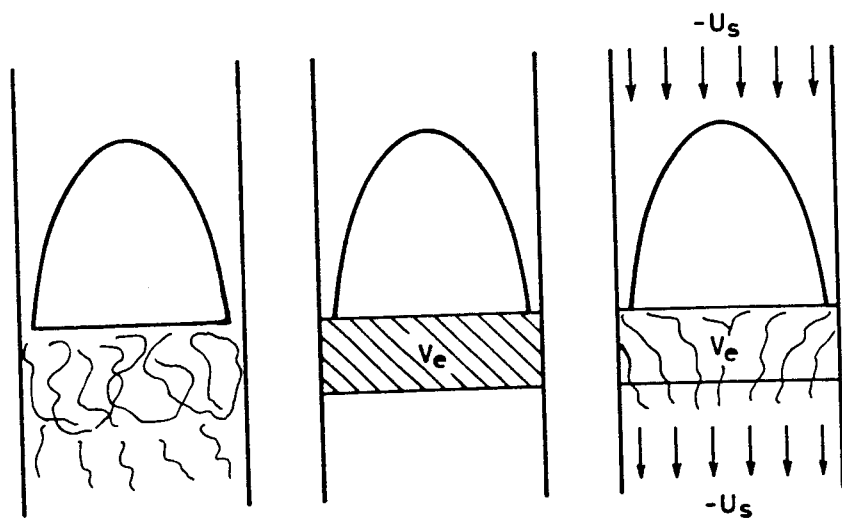


Figura 4.2 - Representação esquemática da esteira de um "slug" em ascensão numa coluna de água: a) situação real; b) a aproximação da realidade, tomando um referencial fixo; c) aproximação, tomando um referencial preso ao "slug".

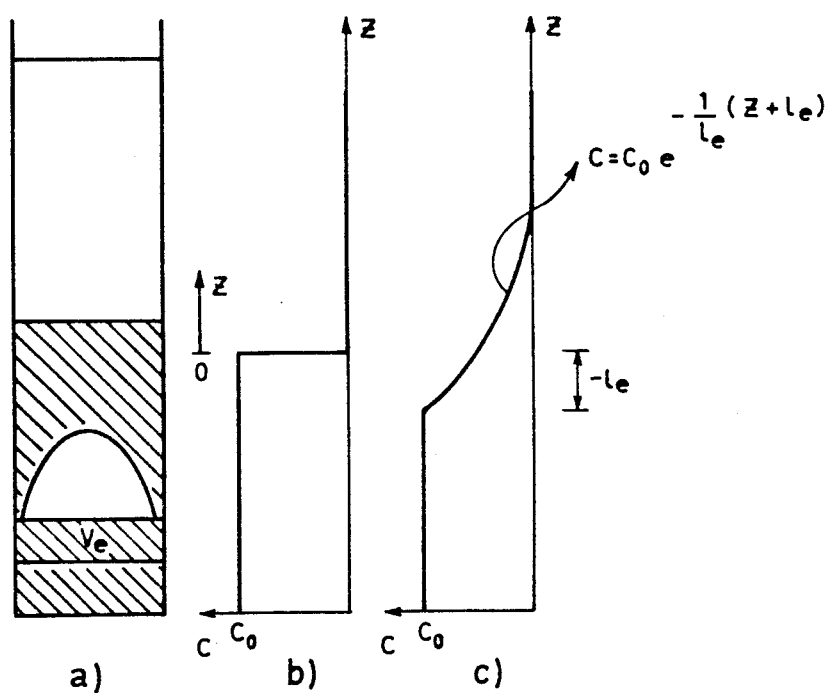


Figura 4.3 - a) Distribuição de soluto após a injeção do "slug", supondo que esta não provoca qualquer mistura axial; b) Perfil de concentração após a injeção do "slug"; c) Perfil de concentração após a ação da esteira de um "slug" - equação (4.2).

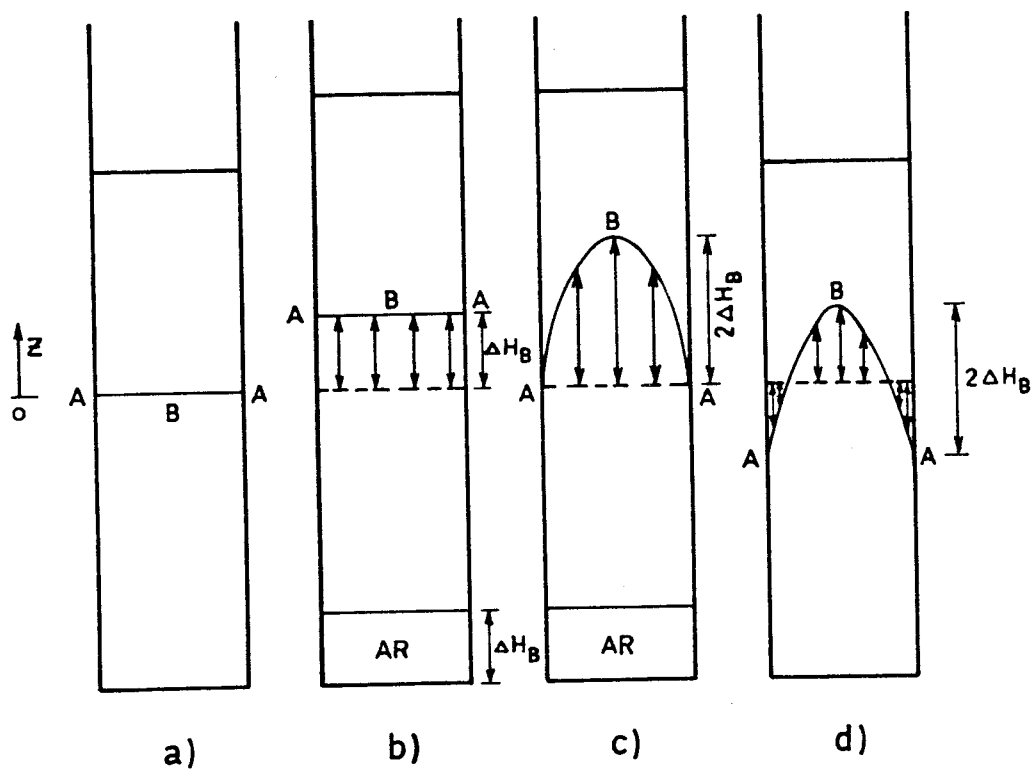


Figura 4.4 - Deslocamento da "linha de fluído" ABA devido à injeção do "slug" na coluna: a) "linha de fluído" ABA antes da injeção do "slug"; b) avanço em escoamento pistão; c) avanço em escoamento de Poiseuille; d) avanço, relativamente ao avanço médio, em escoamento de Poiseuille.

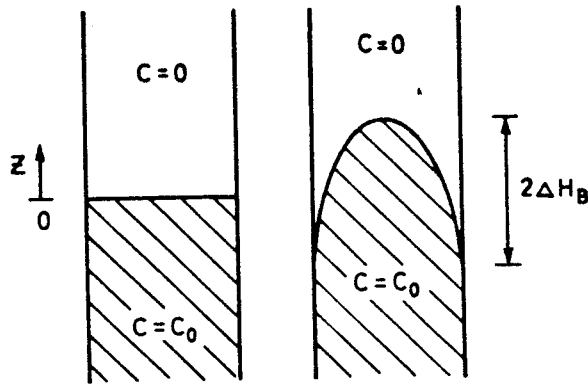


Figura 4.5 - Esquema ilustrativo da existência de gradientes radiais de concentração após a injeção de um "slug".

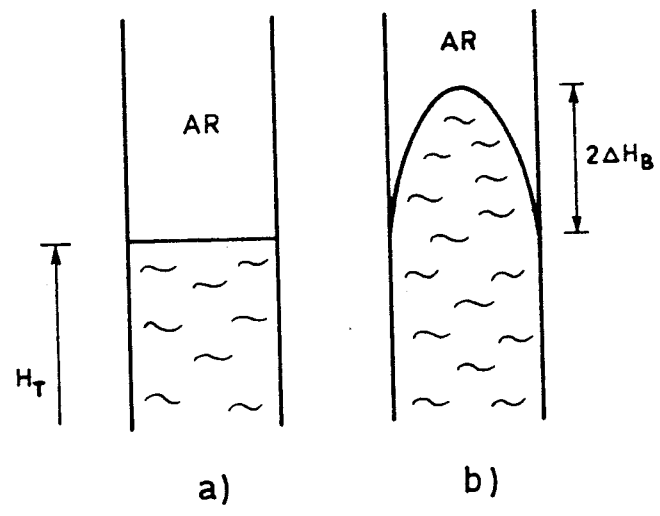


Figura 4.6 - Esquema do comportamento do topo da coluna, no caso da equação (4.10) ser tomada como válida desde $-H_B$ até H_T .

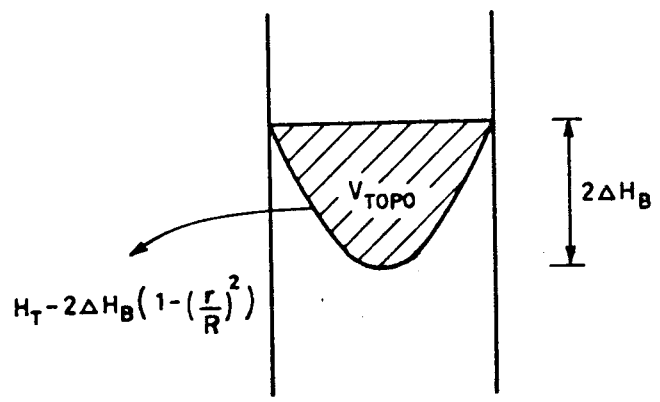
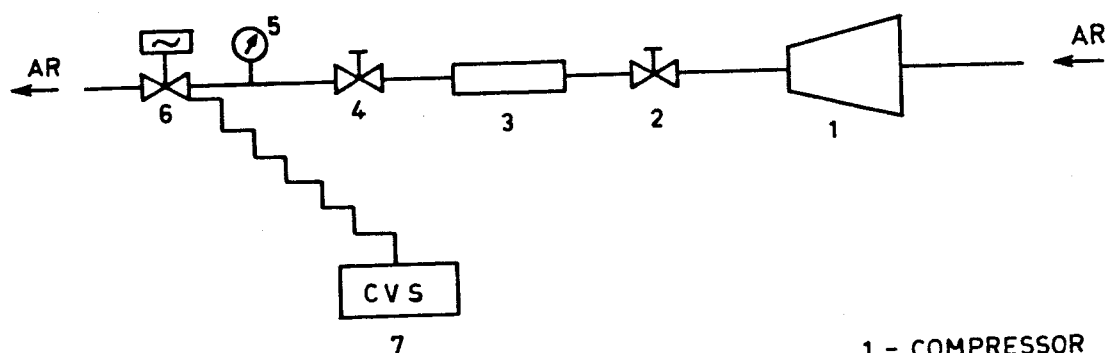


Figura 4.7 - Esquema da simulação da mistura no topo da coluna - equação (4.13).



- 1 - COMPRESSOR
- 2 - MANO - REDUTOR
- 3 - CÂMARA DE COMPENSAÇÃO
- 4 - VÁLVULA DE AGULHA
- 5 - MANÓMETRO
- 6 - VÁLVULA DE SOLENÓIDE
- 7 - CONTROLADOR

Figura 4.8 - Representação esquemática do sistema de injeção do "slug" na coluna.

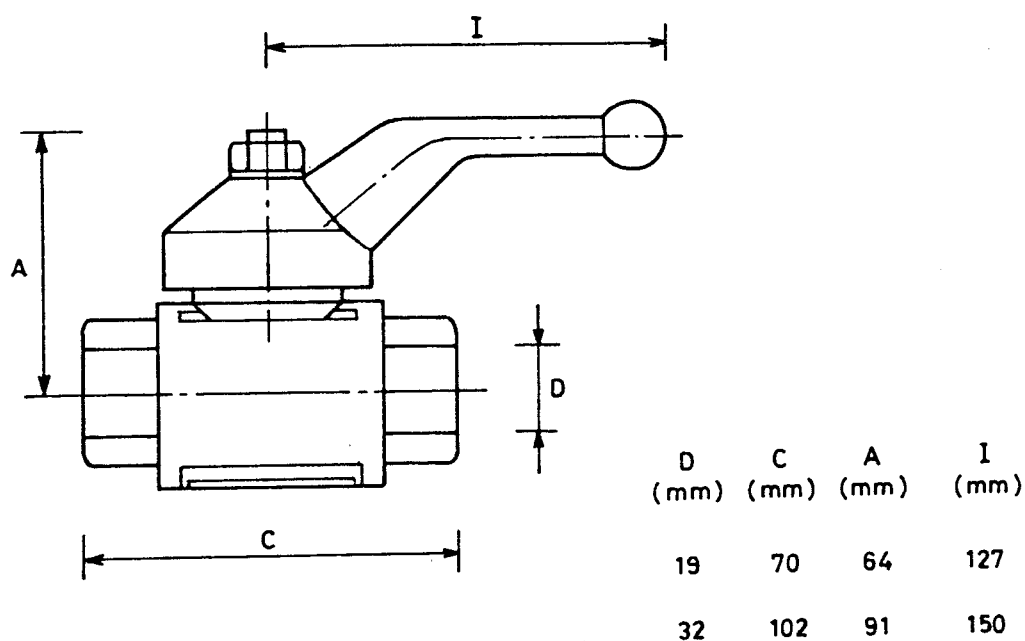


Figura 4.9 - Representação das válvulas de esfera utilizadas no estudo experimental.

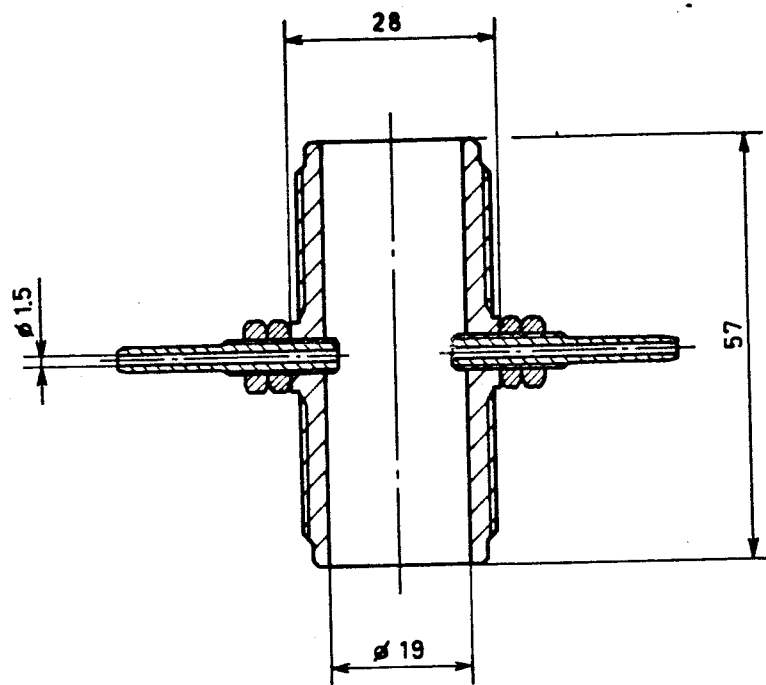


Figura 4.10 - Representação em corte de uma secção de amostragem da coluna de 19 mm.

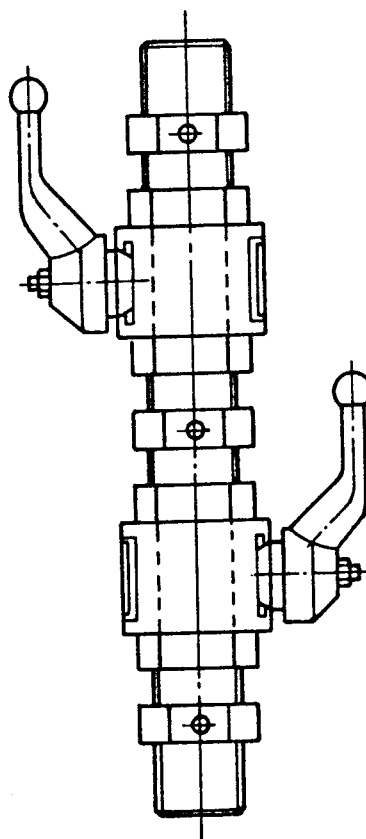


Figura 4.11 - Representação de uma parte da coluna de 19 mm de diâmetro interno.

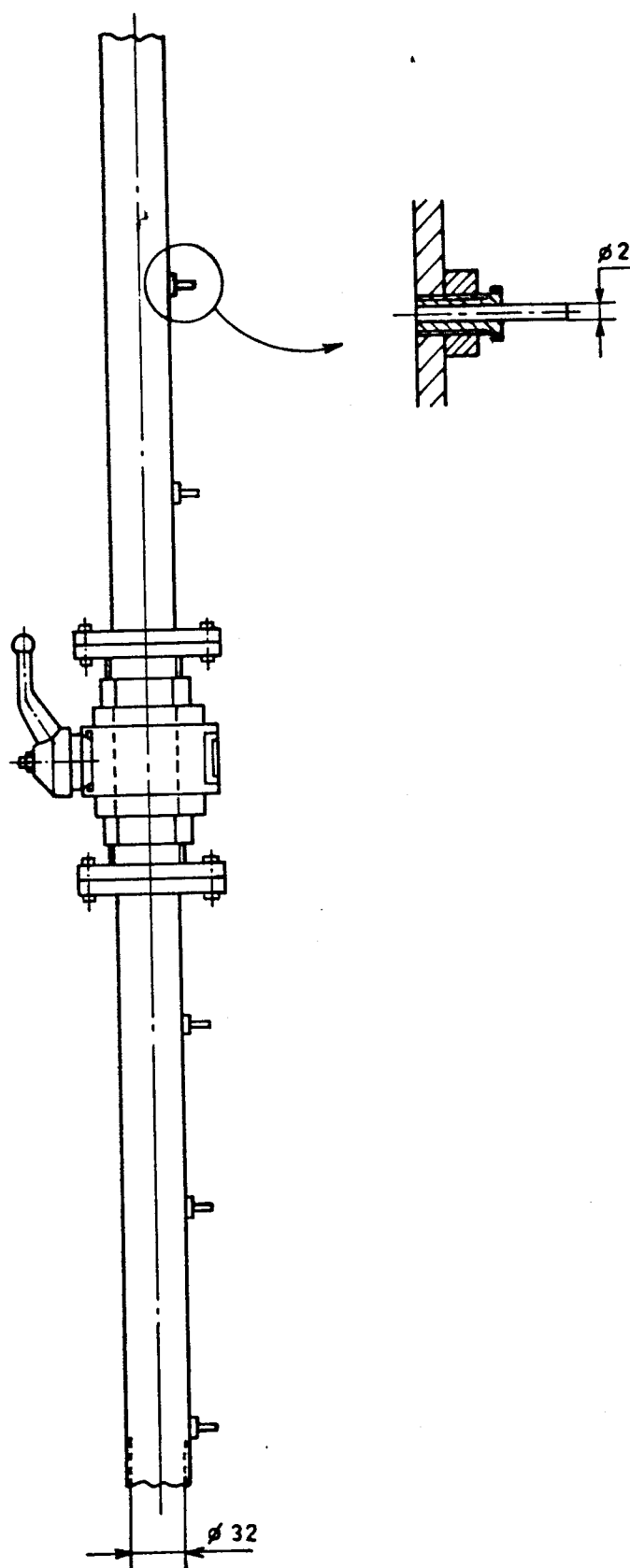


Figura 4.12 - Representação da coluna de 32 mm de diâmetro interno.

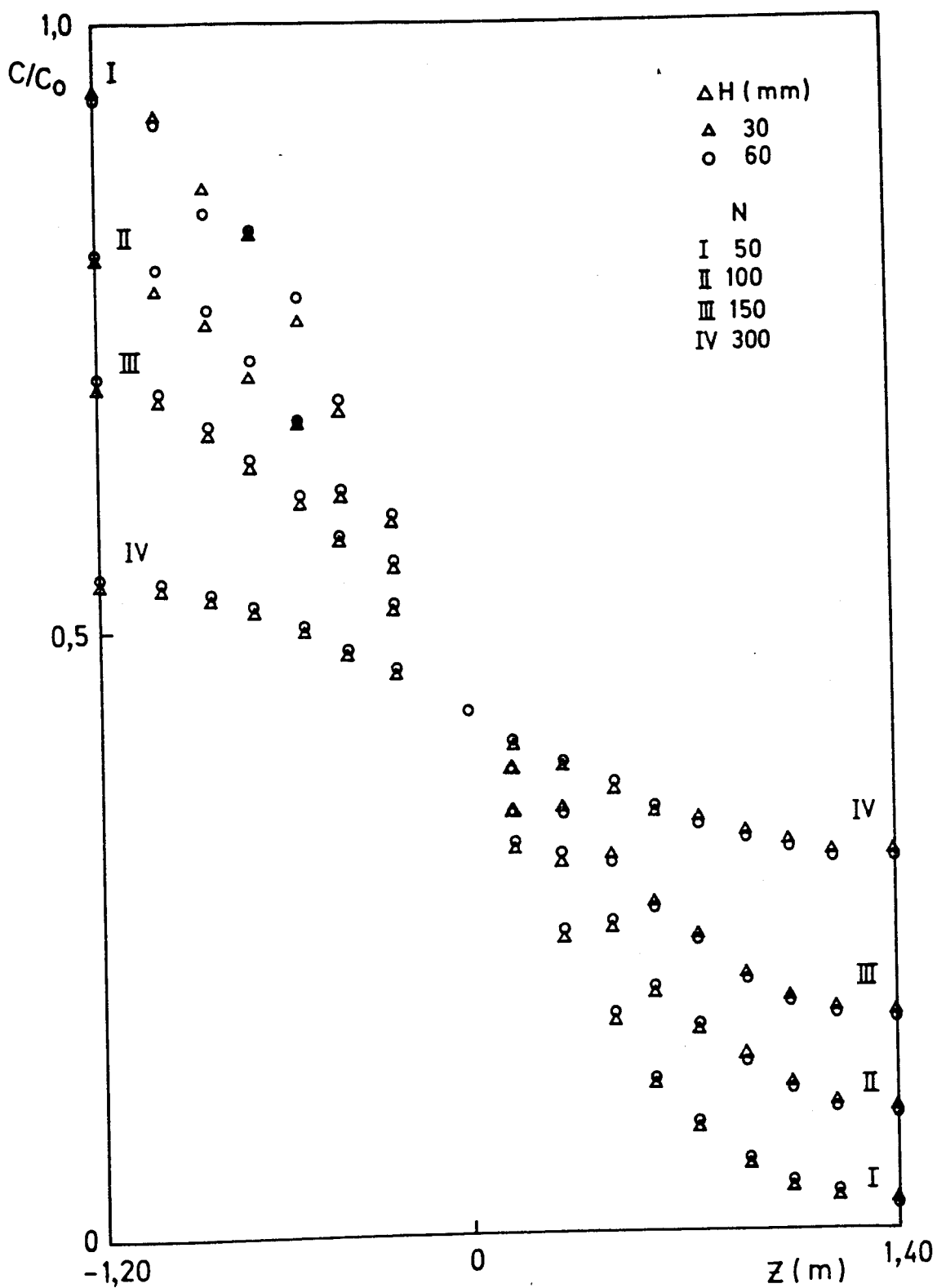


Figura 4.13 a - Comparação entre os perfis experimentais obtidos com "slugs" de $\Delta H = 30$ e 60 mm; $D = 32$ mm.

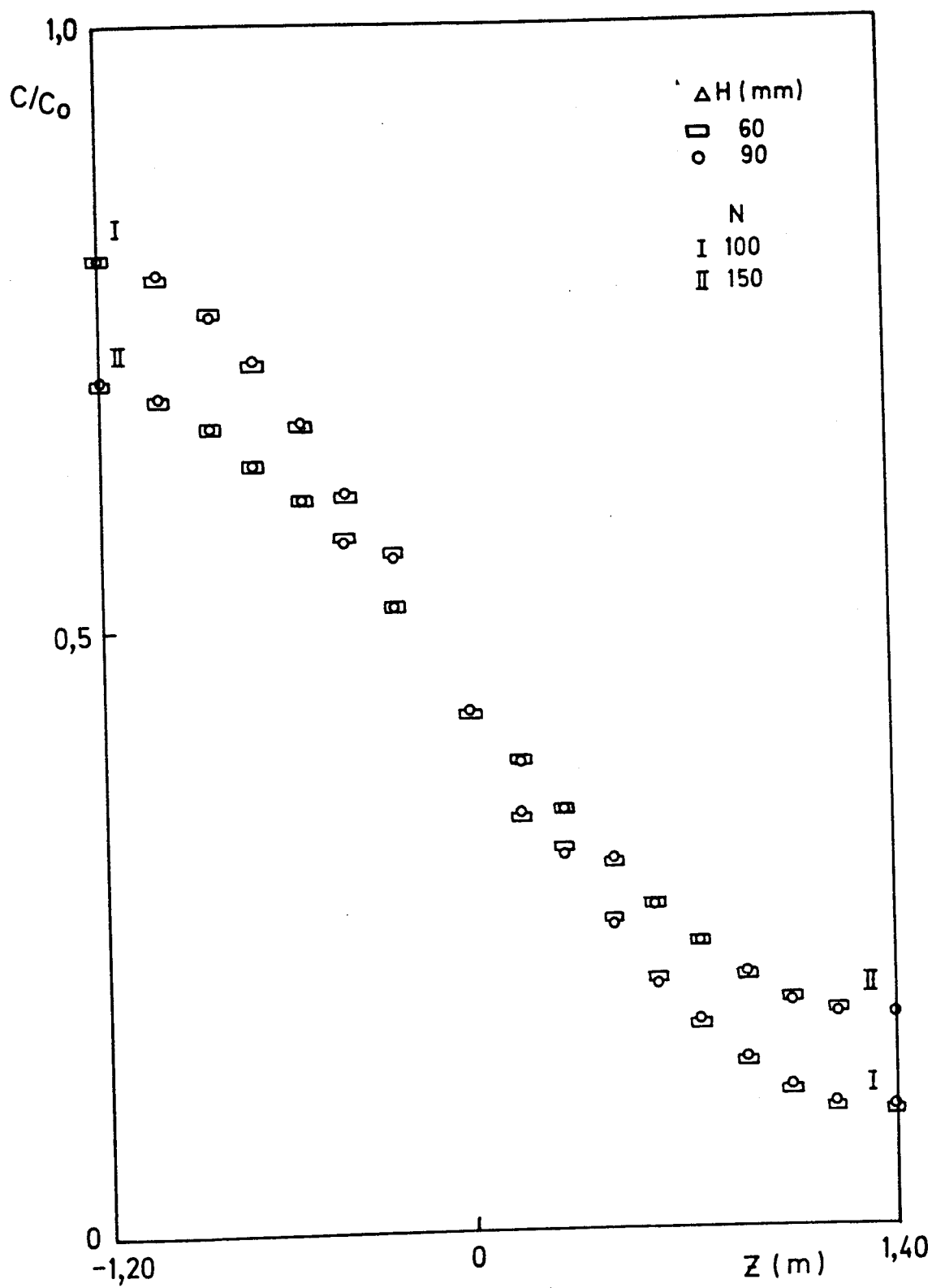


Figura 4.13 b - Comparação entre os perfis experimentais obtidos com "slugs" de $\Delta H = 60$ e 90 mm ; $D = 32 \text{ mm}$.

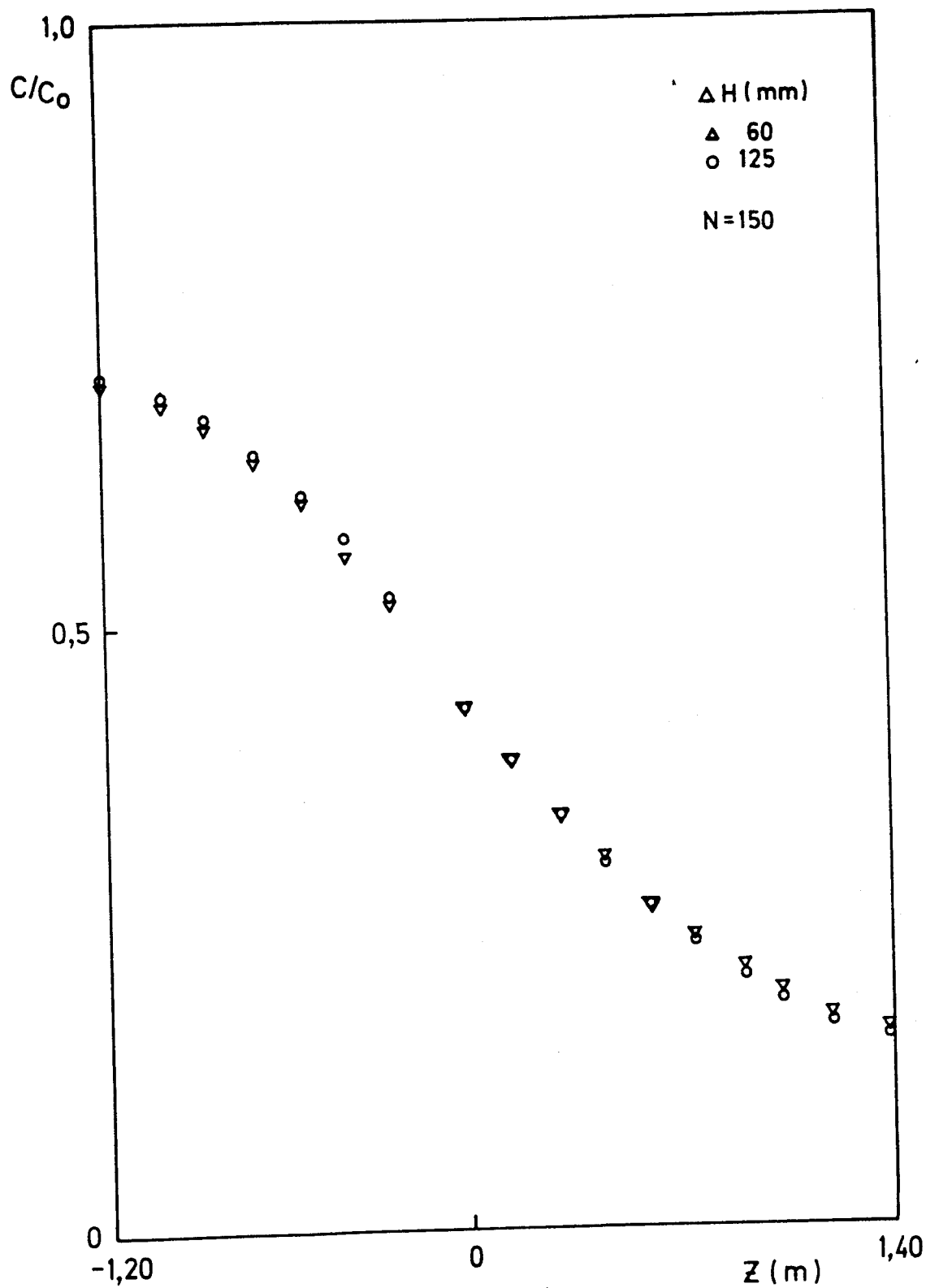


Figura 4.13 c - Comparação entre os perfis experimentais obtidos com "slugs" de $\Delta H = 60$ e 125 mm; $D = 32$ mm.

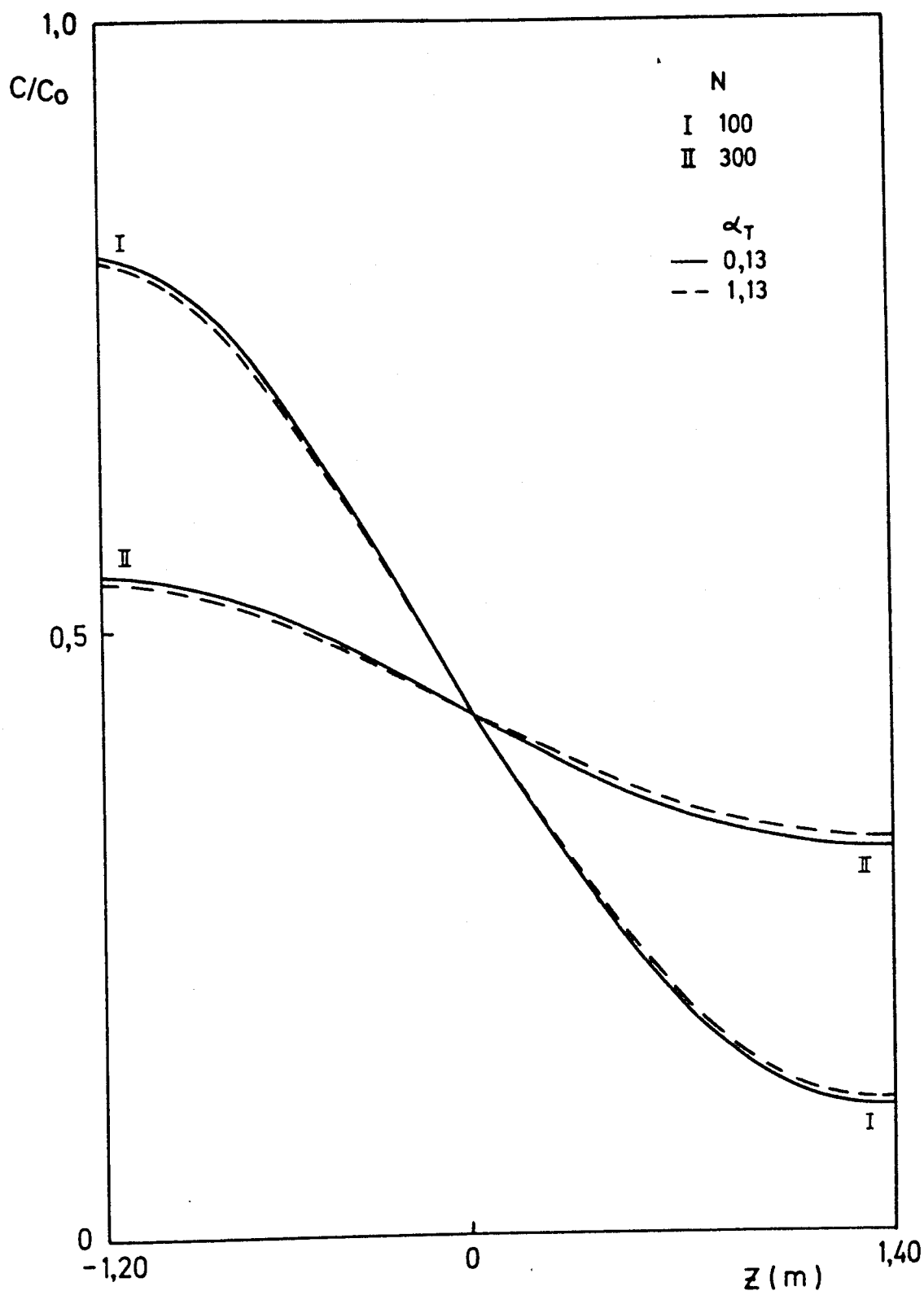


Figura 4.14 a - Perfis obtidos simulando a acção misturadora de "slugs" com $\Delta H = 30$ mm para diferentes valores do parâmetro que caracteriza o deslocamento provocado pela injeção (α_T); $D = 32$ mm, $\ell_e/D = 2,8$.

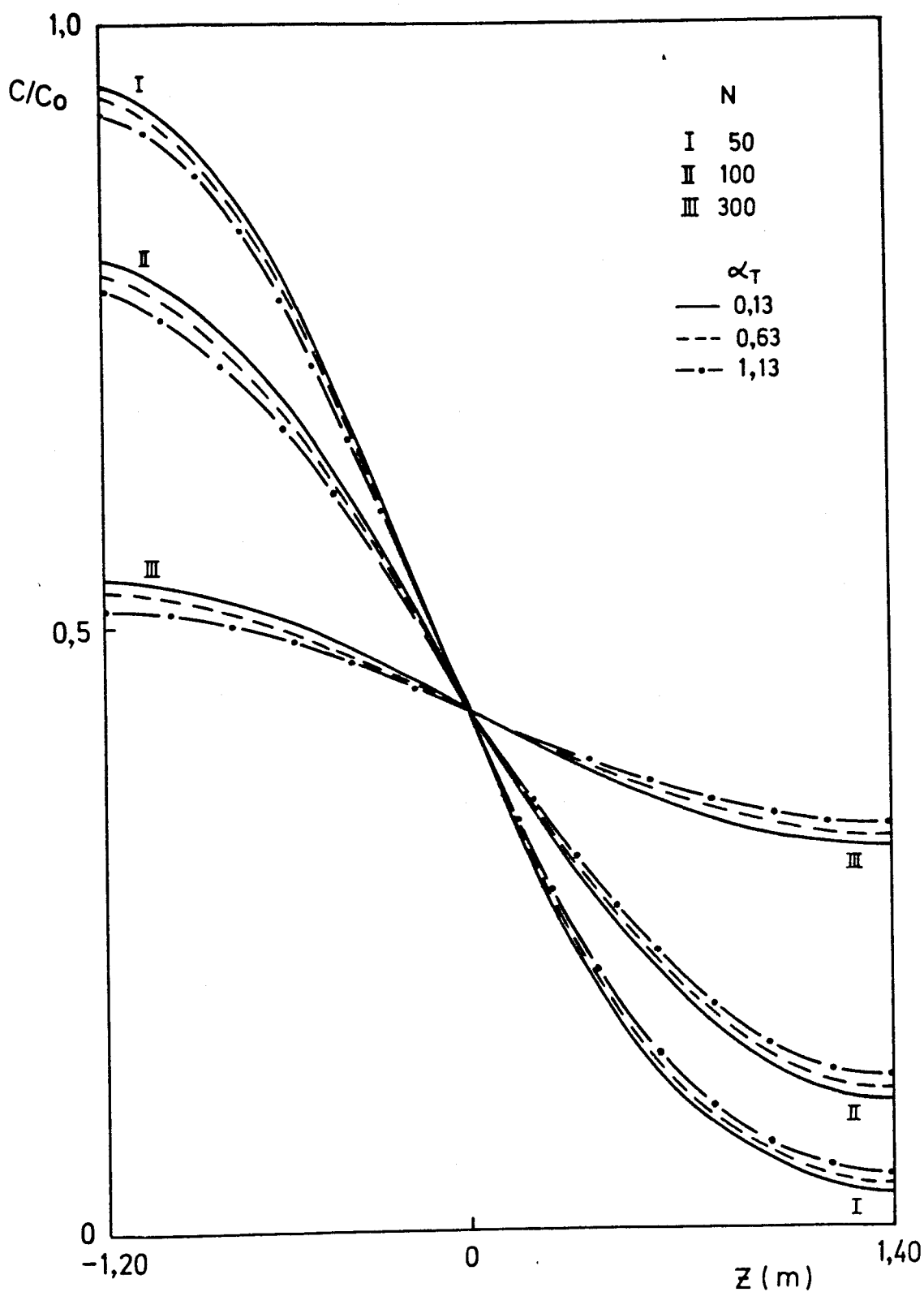


Figura 4.14 b - Perfis obtidos simulando a acção misturadora de "slugs" com $\Delta H = 60 \text{ mm}$ para diferentes valores do parâmetro que caracteriza o deslocamento provocado pela injeção (α_T); $D = 32 \text{ mm}$; $\ell_e/D = 2,8$.

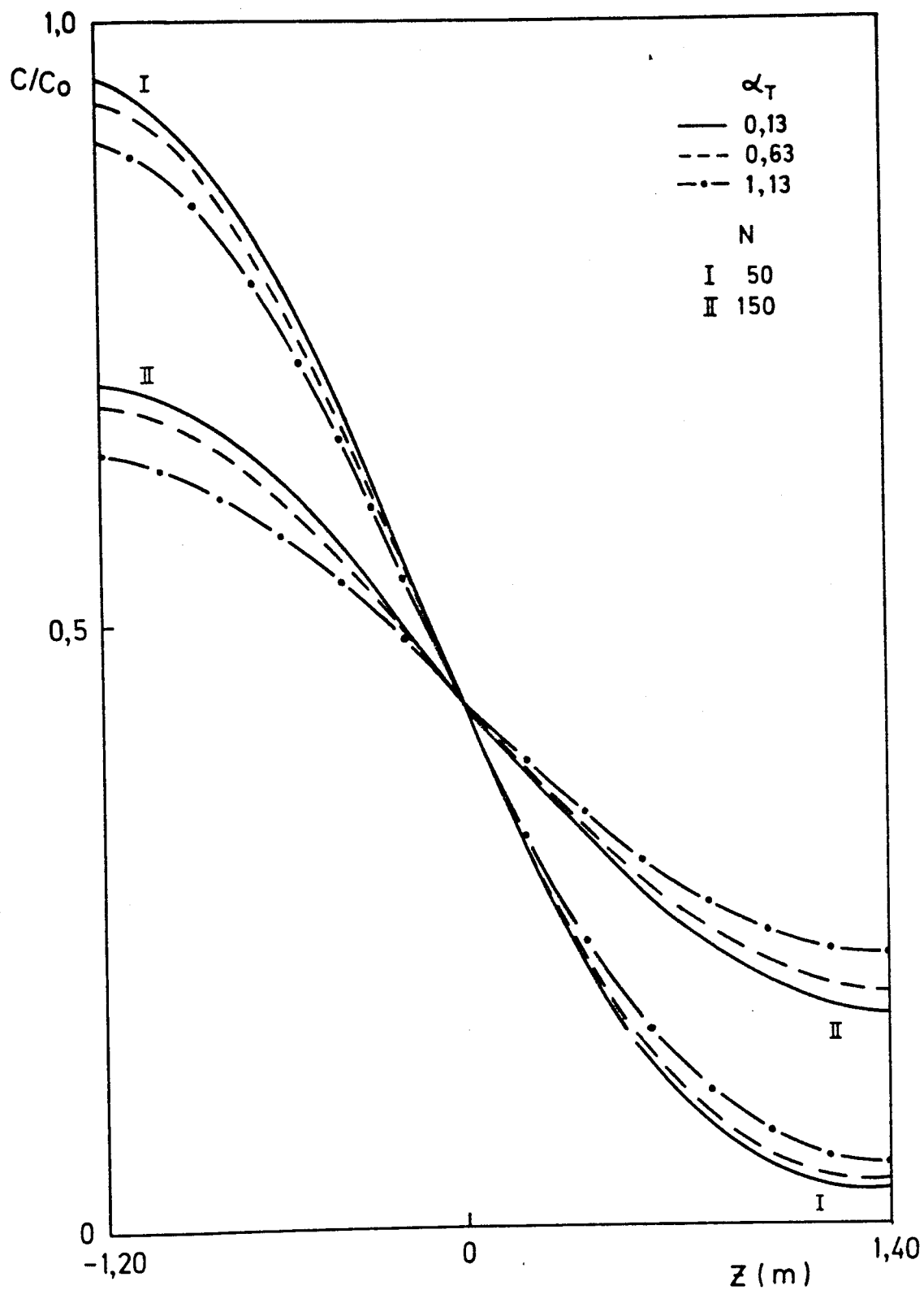


Figura 4.14 c - Perfis obtidos simulando a acção misturadora de "slugs" com $\Delta H = 90$ mm, para diferentes valores do parâmetro que caracteriza o deslocamento provocado pela injeção (α_T); $D \cong 32$ mm, $l_e/D = 2,8$.

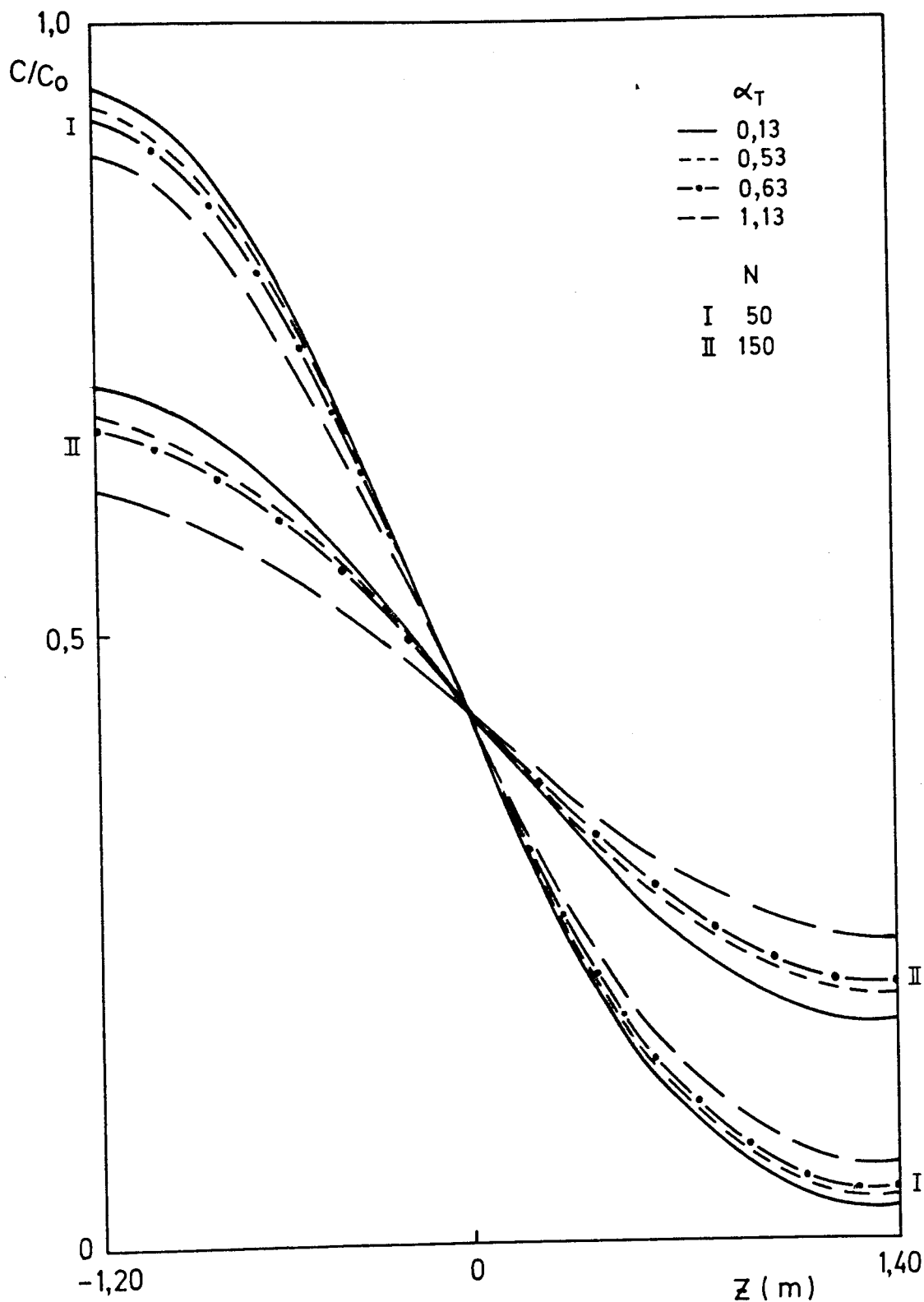


Figura 4.14 d - Perfis obtidos simulando a acção misturadora de "slugs" com $\Delta H = 125 \text{ mm}$ para diferentes valores do parâmetro que caracteriza o deslocamento provocado pela injeccção (α_T); $D = 32 \text{ mm}$; $l_e/D = 2,8$.

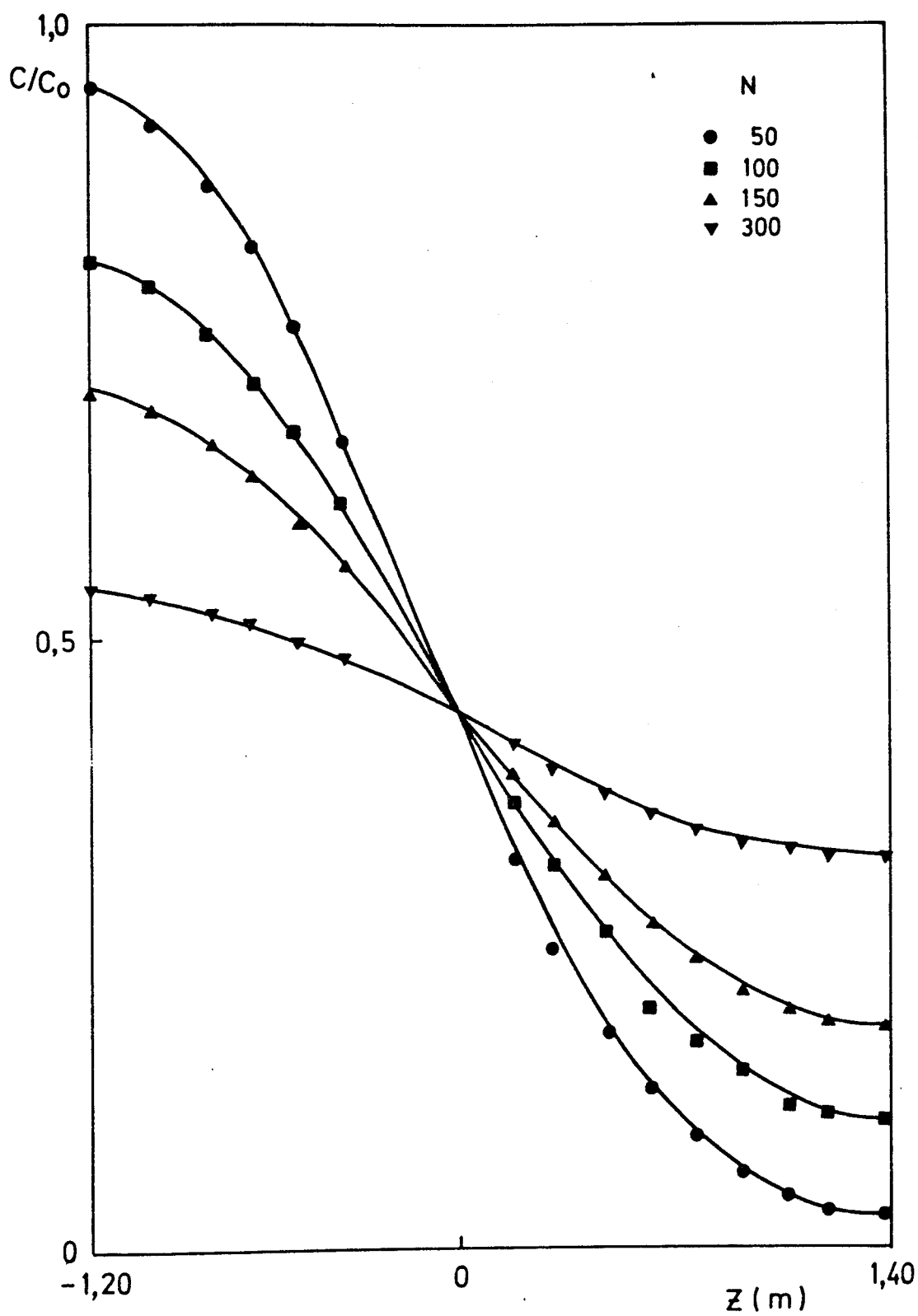


Figura 4.15 - Comparação entre os perfis experimentais e os obtidos por simulação tomando $\varphi_e/D = 2,8 D$, para "slugs" com $\Delta H \geq 30$ mm; $D = 32$ mm, $\alpha_T = 0,13$.

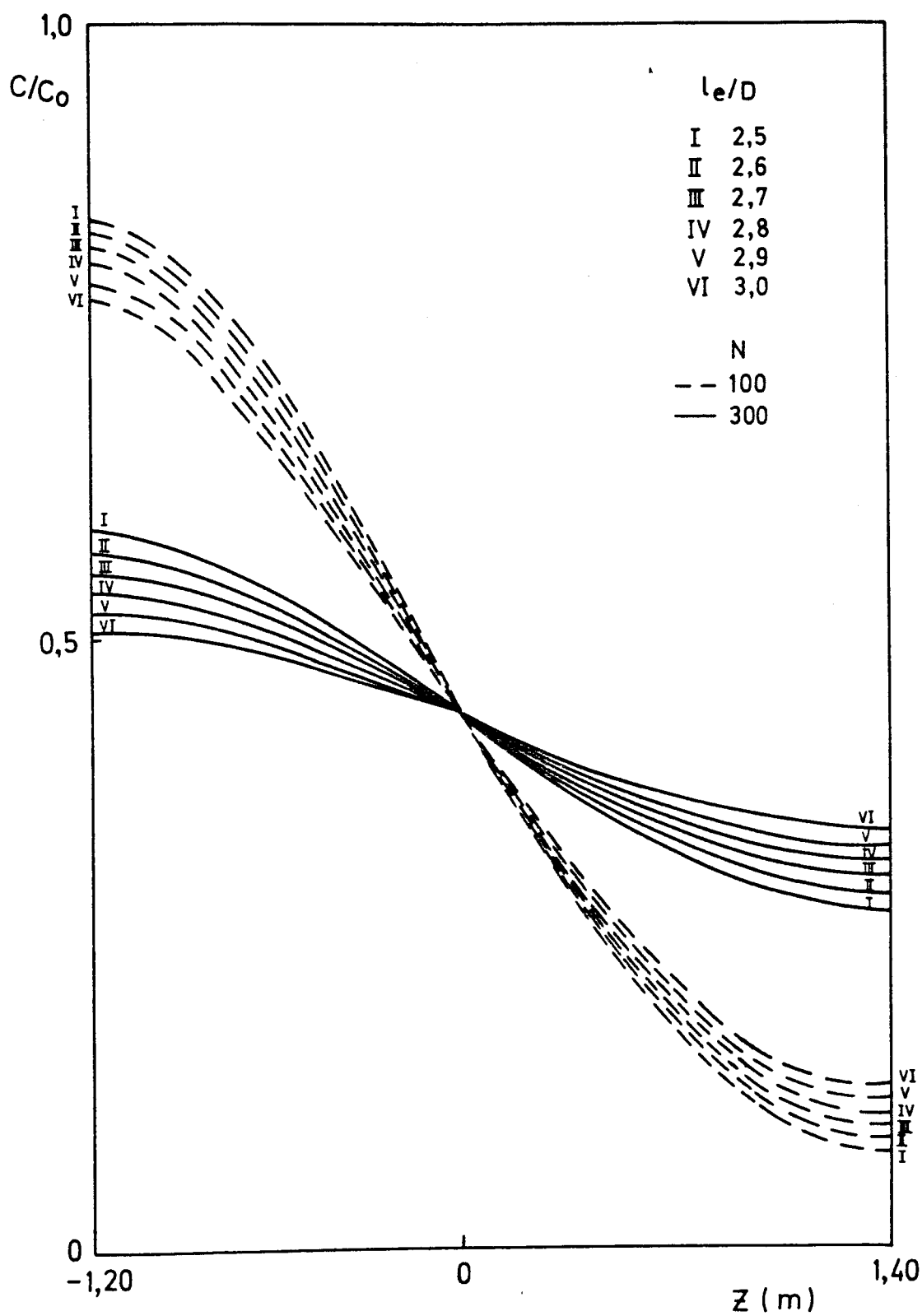


Figura 4.16 - Estudo da sensibilidade da mistura ao valor de l_e/D ; $D = 32 \text{ mm}$ e $\alpha_T = 0,13$.

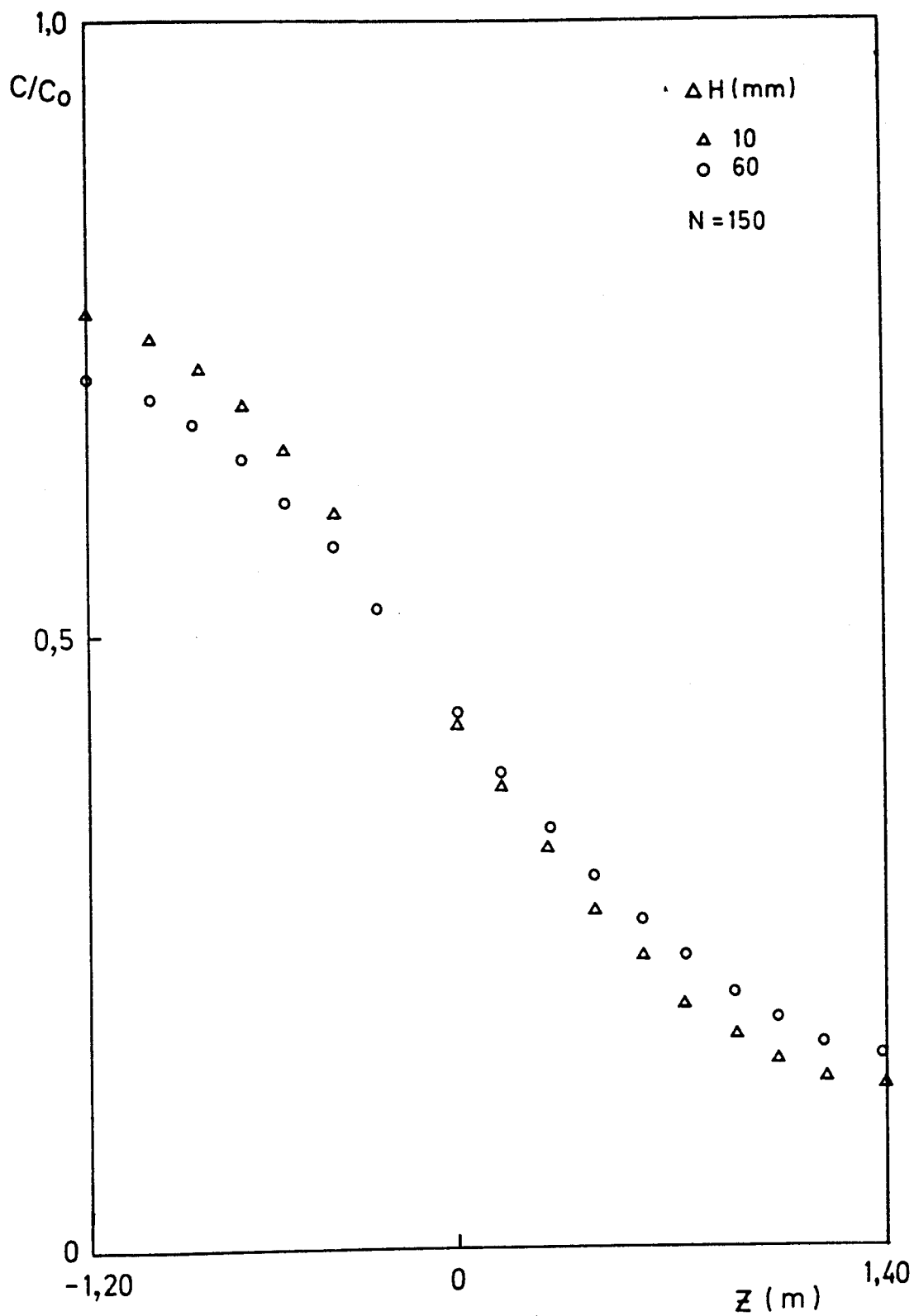


Figura 4.17 - Comparação entre os perfis experimentais obtidos com "slugs" de $\Delta H = 10$ e 60 mm; $D = 32$ mm.

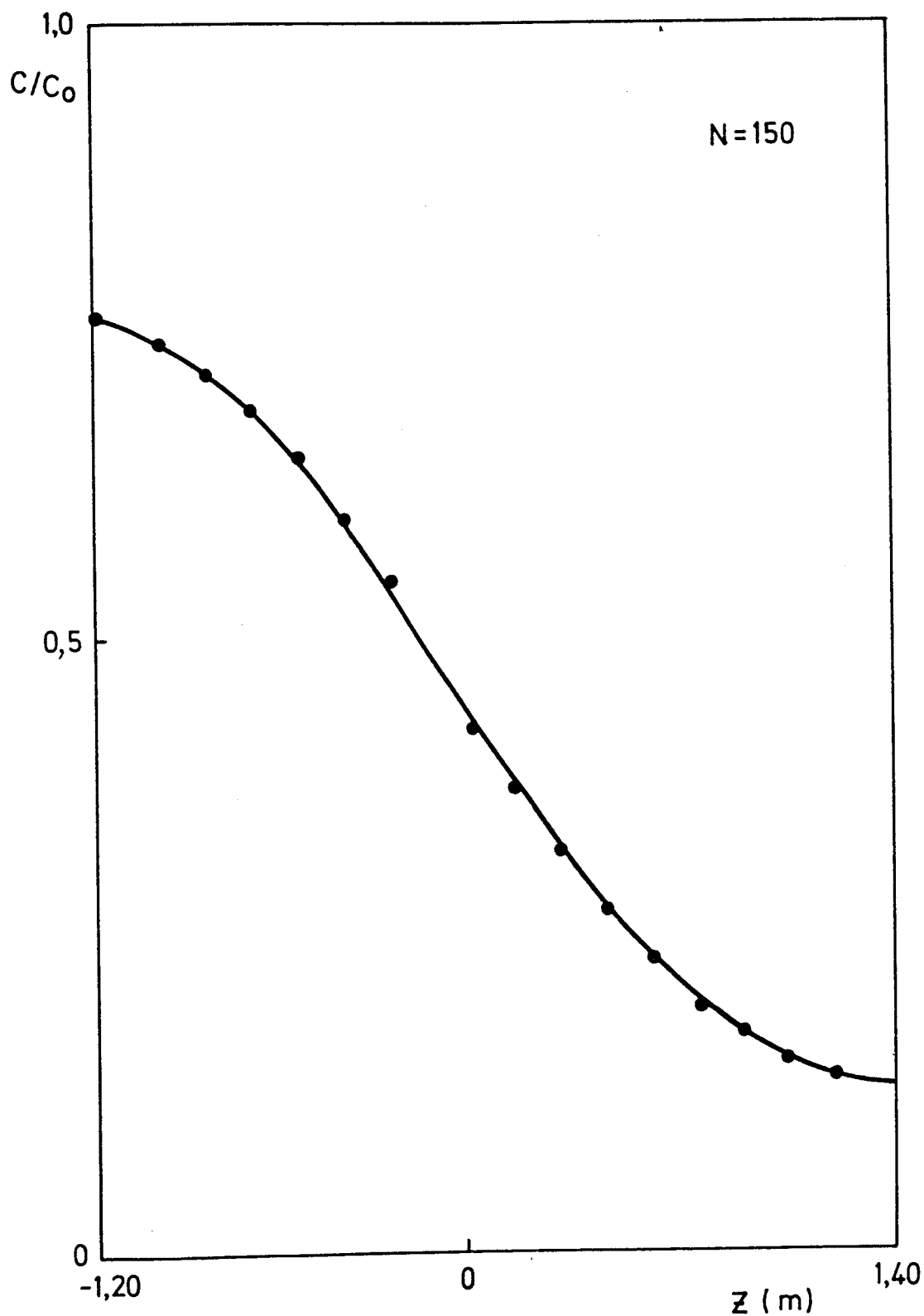


Figura 4.18 - Comparação entre os perfis experimentais e os obtidos por simulação tomando $\ell_e/D = 2,5$ para "slugs" com $\Delta H = 10$ mm; $D = 32$ mm; $\alpha_T = 0,13$.

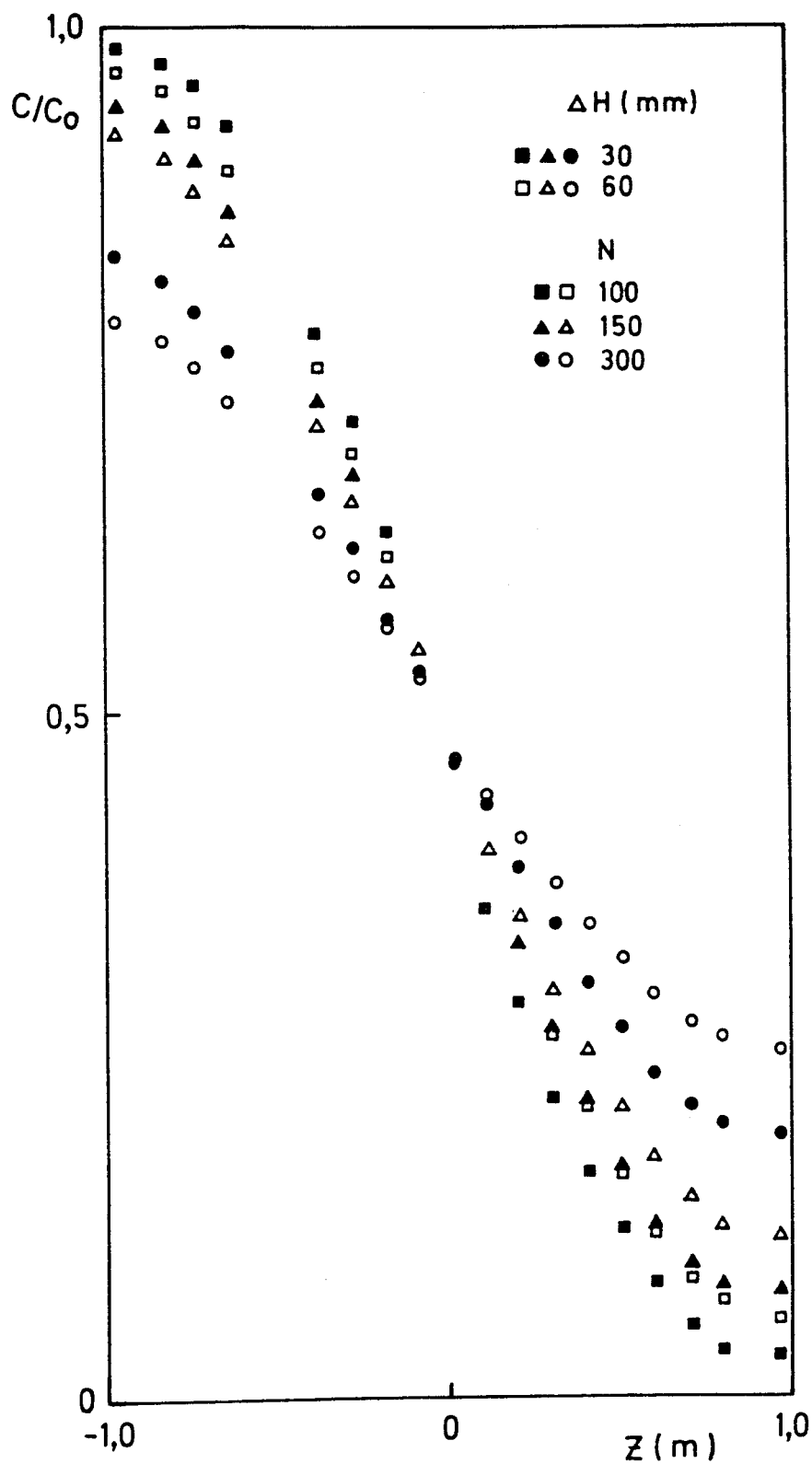


Figura 4.19 - Comparação entre os perfis experimentais obtidos com "slugs" de $\Delta H = 30$ e 60 mm; $D = 19$ mm.

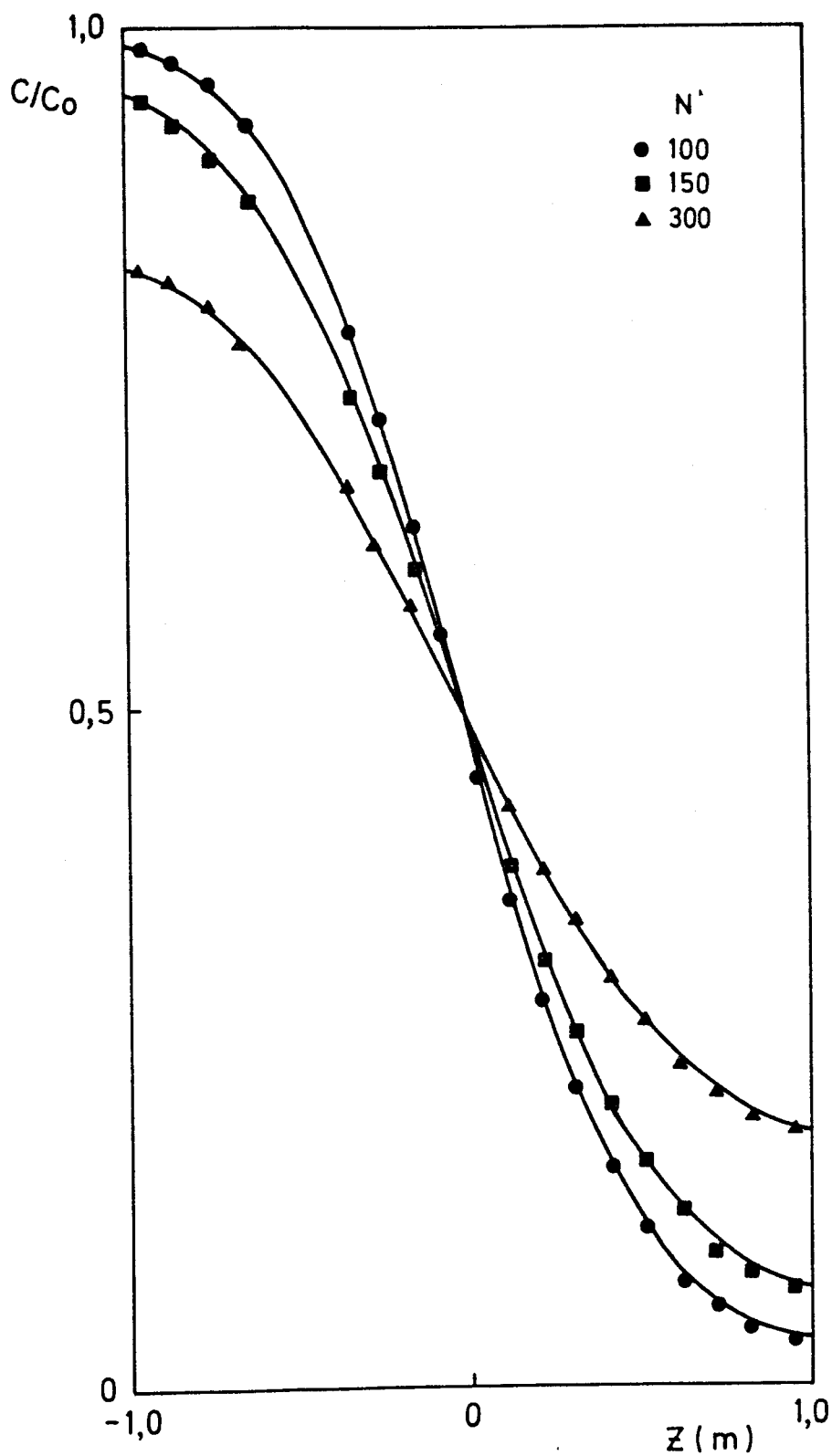


Figura 4.20 - Comparação entre os perfis experimentais e os obtidos por simulação tomando $\ell_e/D = 2,2$ e $\alpha_T = 0,7$ para "slugs" com $\Delta H = 30$ mm; $D = 19$ mm.

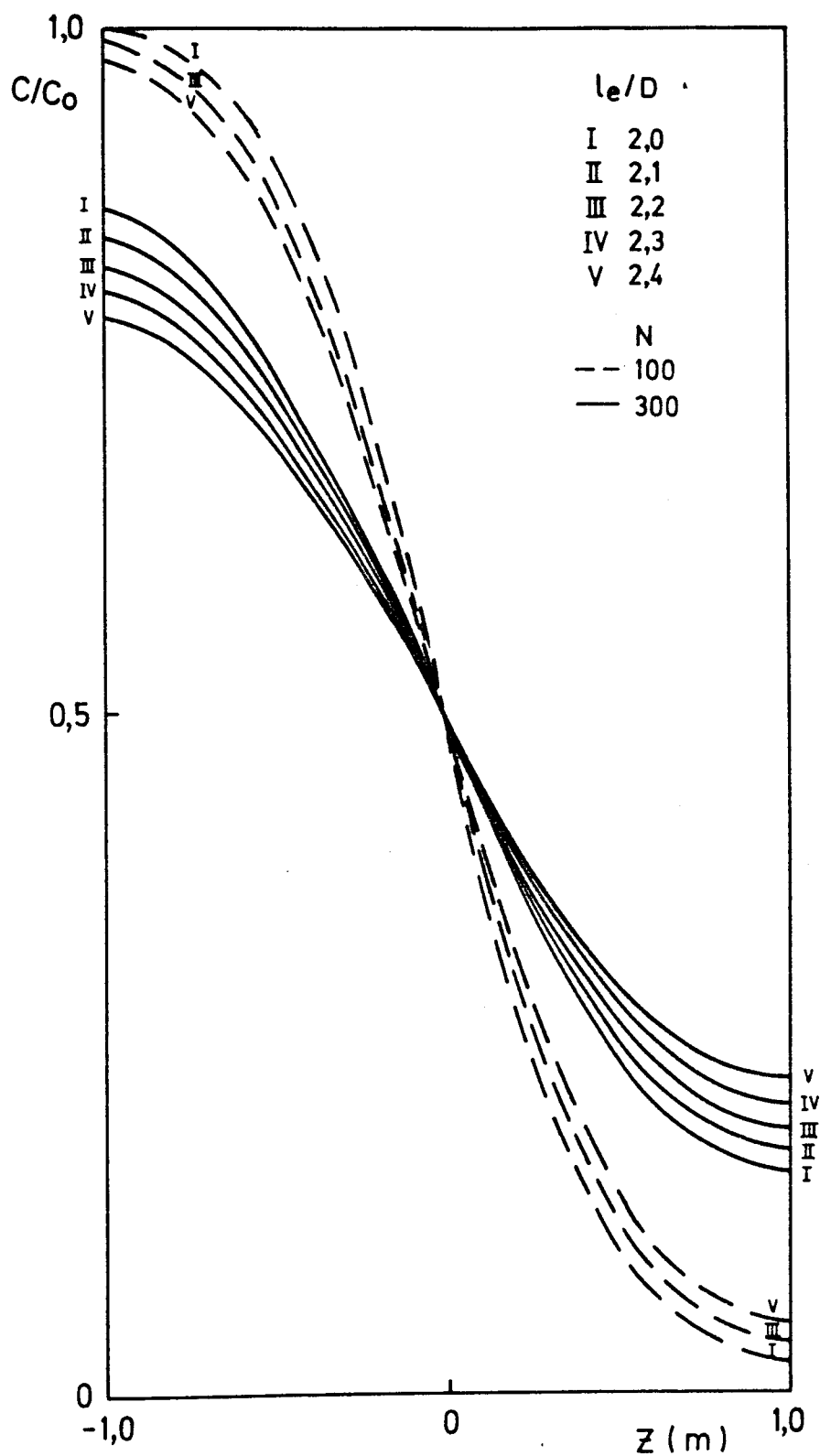


Figura 4.21 - Estudo da sensibilidade da mistura ao valor de l_e/D tomando $\alpha_T = 0,7$ para "slugs" com $\Delta H = 30$ mm; $D = 19$ mm.

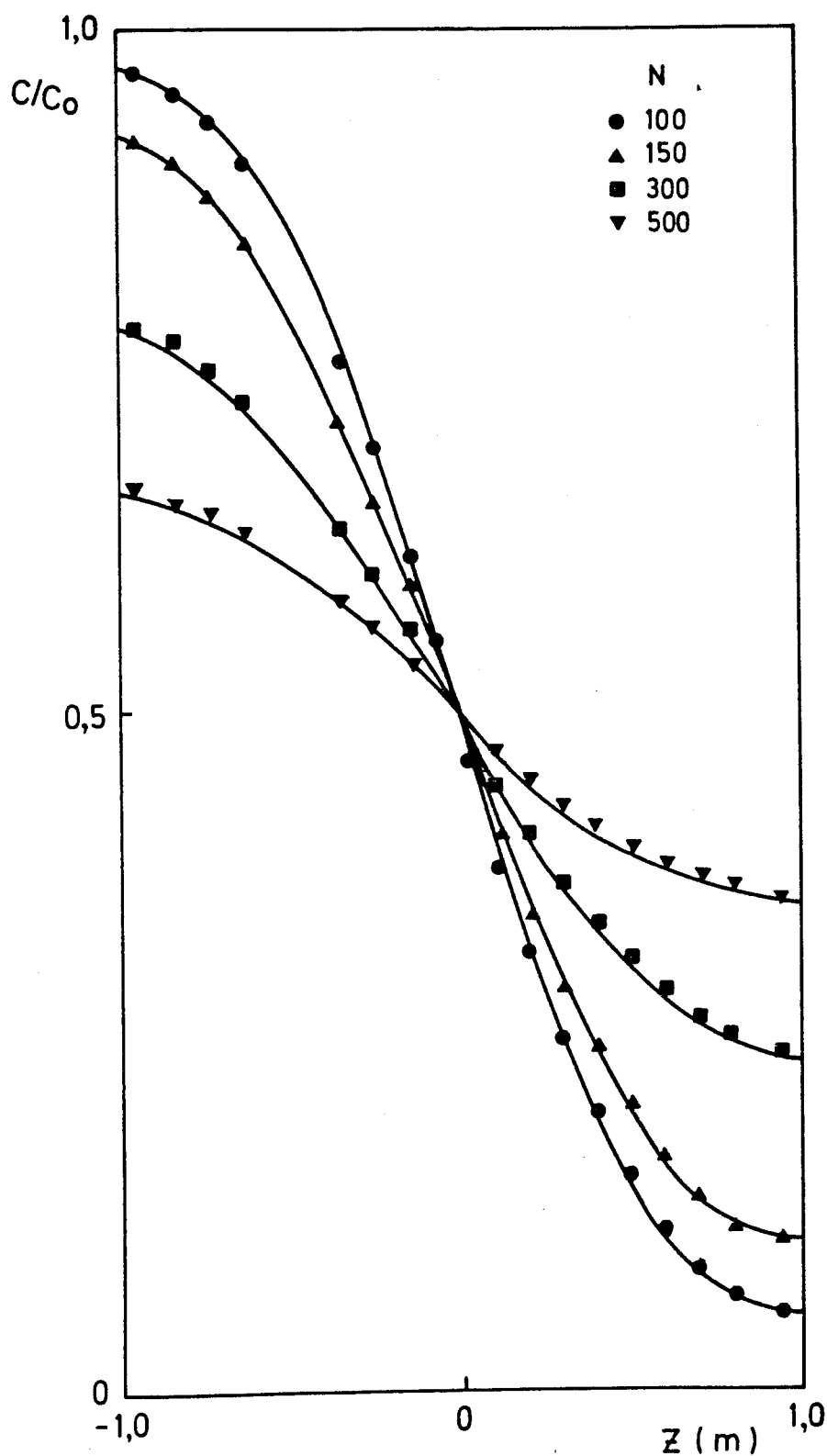


Figura 4.22 a - Comparação entre os perfis experimentais e os obtidos por simulação tomando $\ell_e/D = 2,3$ e $\alpha_T = 0,7$ para "slugs" com $\Delta H = 60$ mm; $D = 19$ mm.

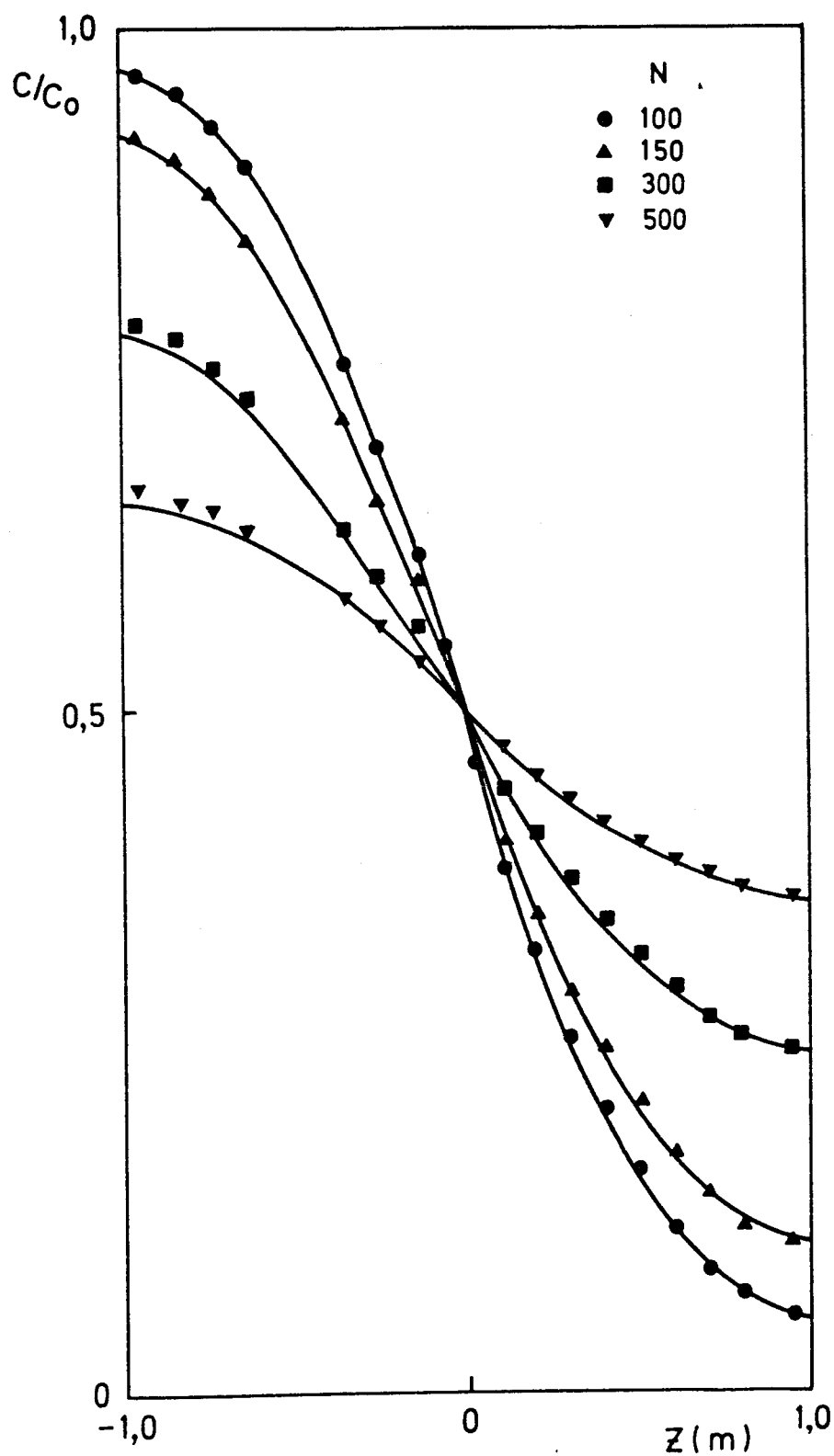


Figura 4.22 b - Comparação entre os perfis experimentais e os obtidos por simulação tomando $\ell_e/D = 2,4$ e $\alpha_T = 0,6$ para "slugs" com $\Delta H = 60$ mm; $D = 19$ mm.

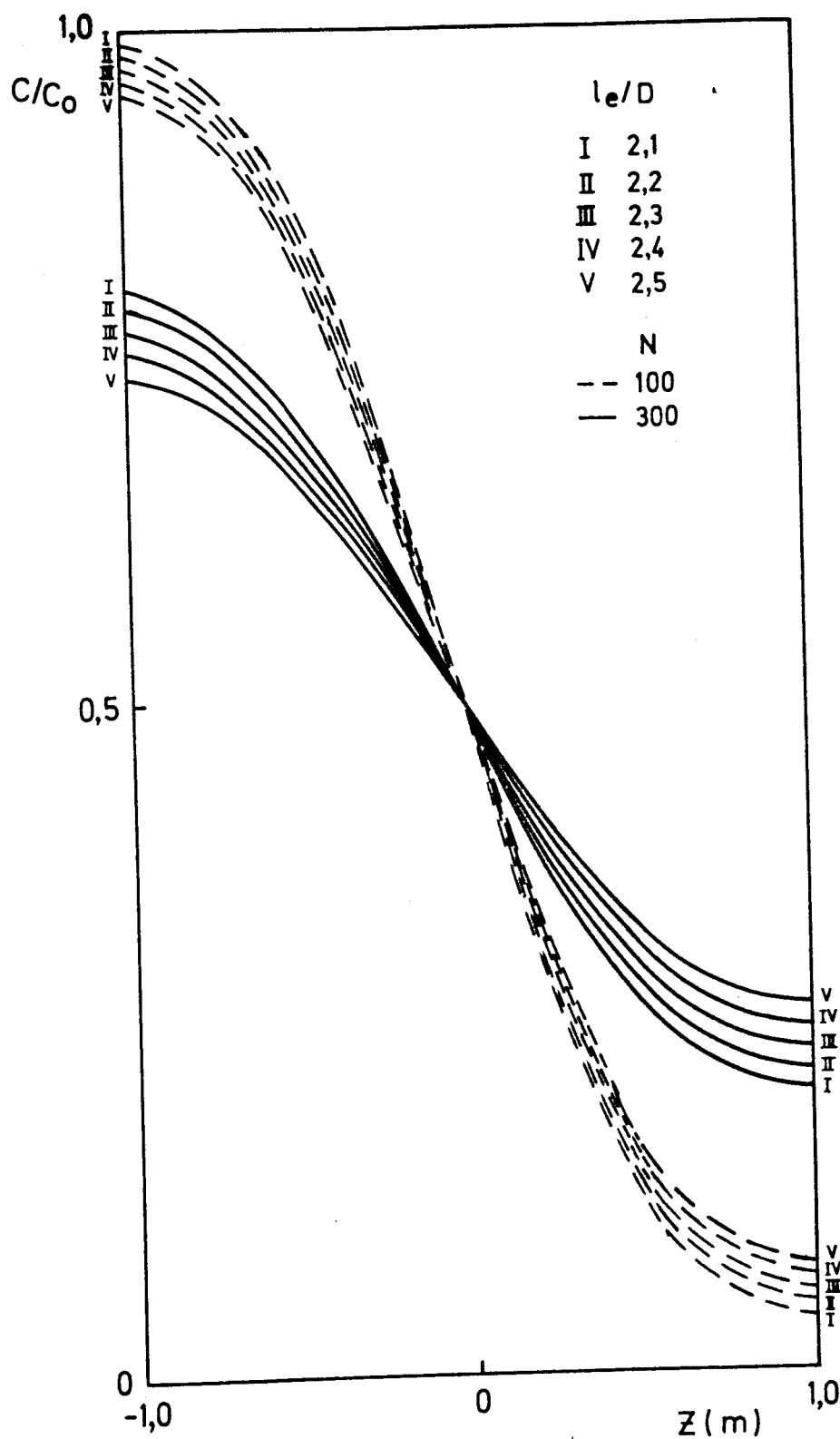


Figura 4.23 - Estudo da sensibilidade da mistura ao valor de l_e/D tomando $\alpha_T = 0,7$ para "slugs" com $\Delta H = 60$ mm; $D = 19$ mm.

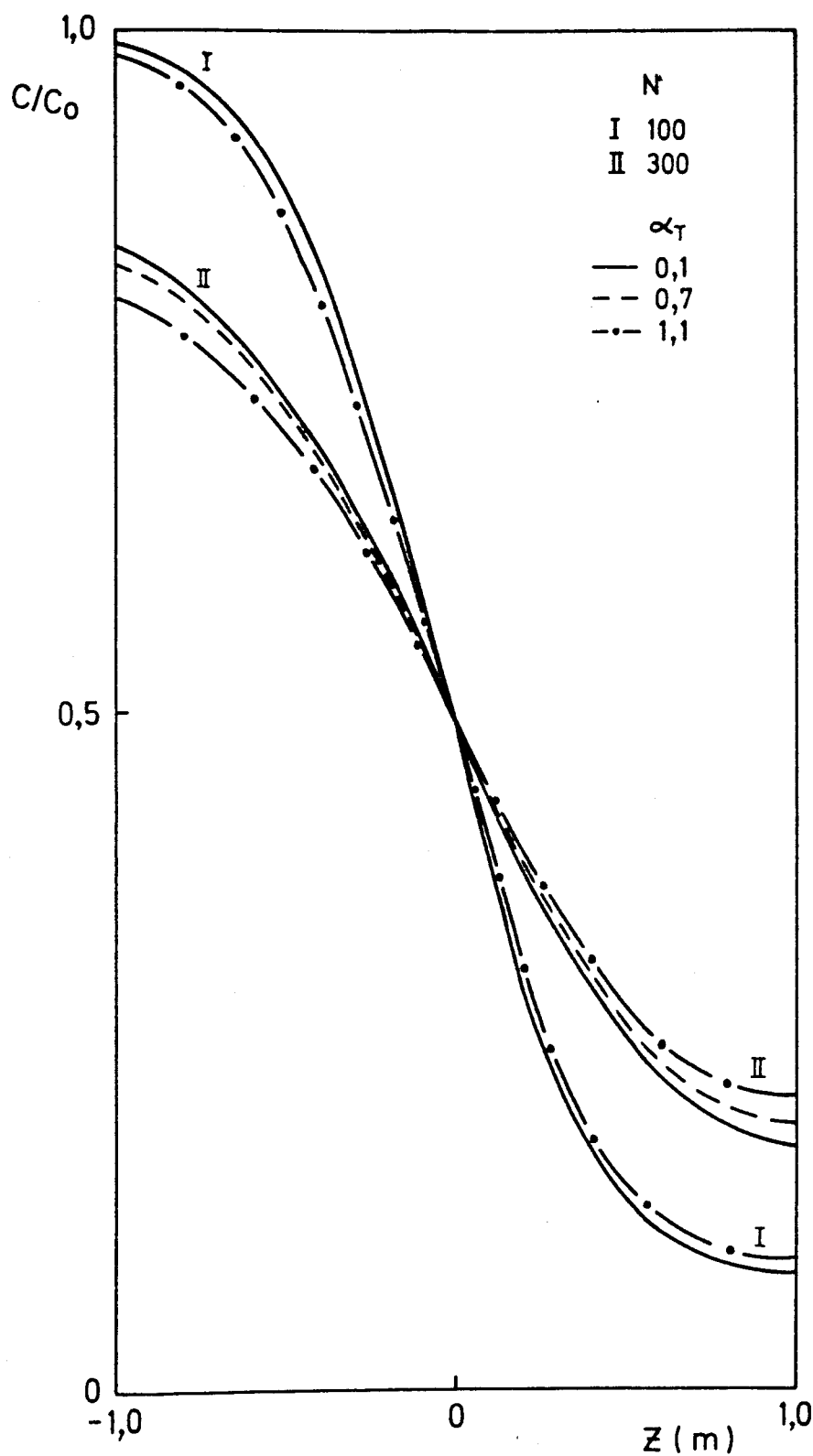


Figura 4.24 a - Perfis obtidos simulando a acção misturadora de "slugs" com $\Delta H = 30$ mm para diferentes valores do parâmetro que caracteriza o deslocamento provocado pela injeção (α_T); $D = 19$ mm, $\ell_e/D = 2,2$.

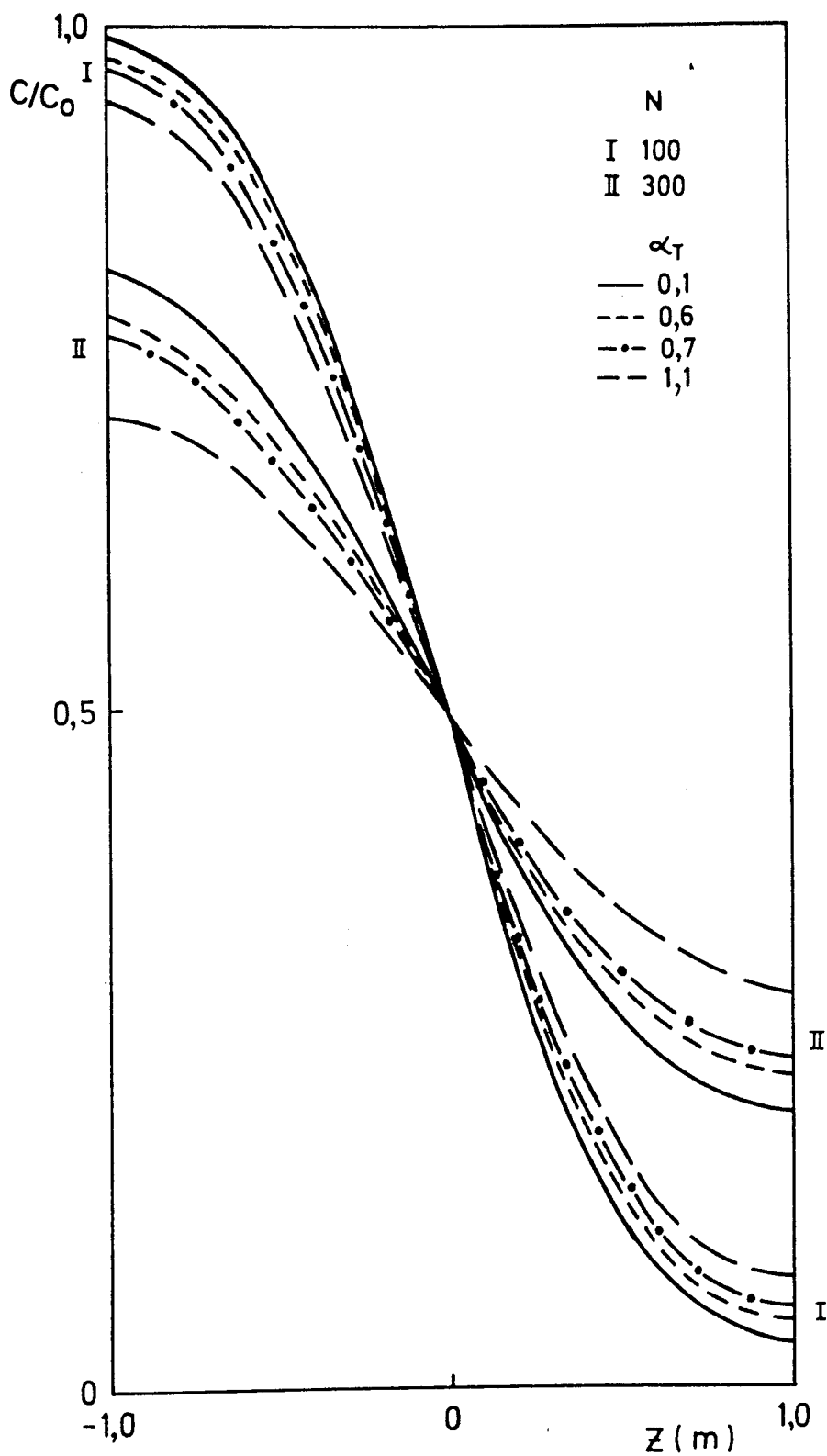


Figura 4.24 b - Perfis obtidos simulando a acção misturadora de "slugs" com $\Delta H = 60$ mm para diferentes valores do parâmetro que caracteriza o deslocamento provocado pela injeção (α_T); $D = 19$ mm, $l_e/D = 2,3$.

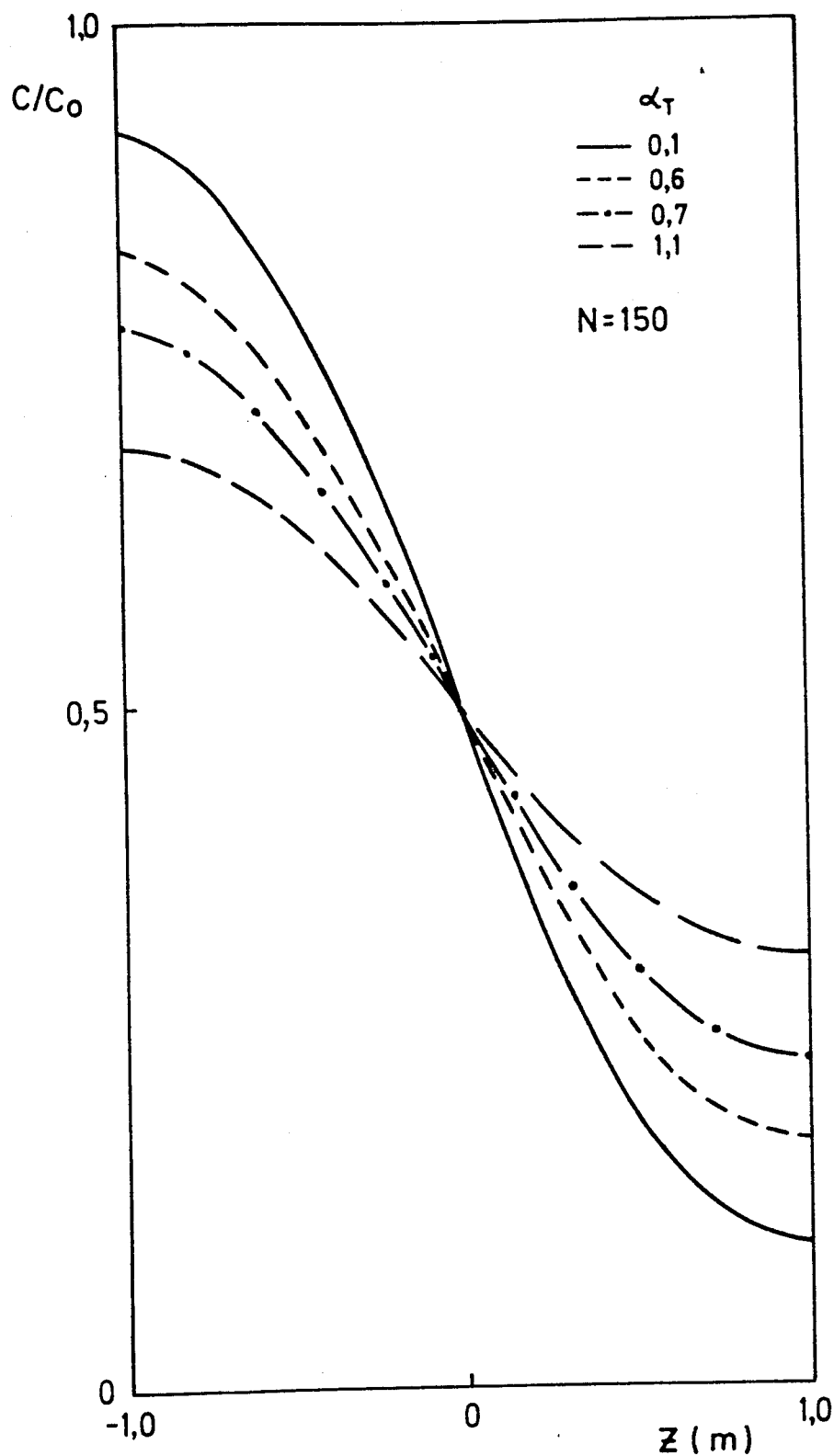


Figura 4.25 - Perfis obtidos simulando a acção misturadora de "slugs" com $\Delta H = 120$ mm para diferentes valores do parâmetro que caracteriza o deslocamento provocado pela injeção (α_T); $D = 19$ mm, $\ell_e/D = 2,5$.

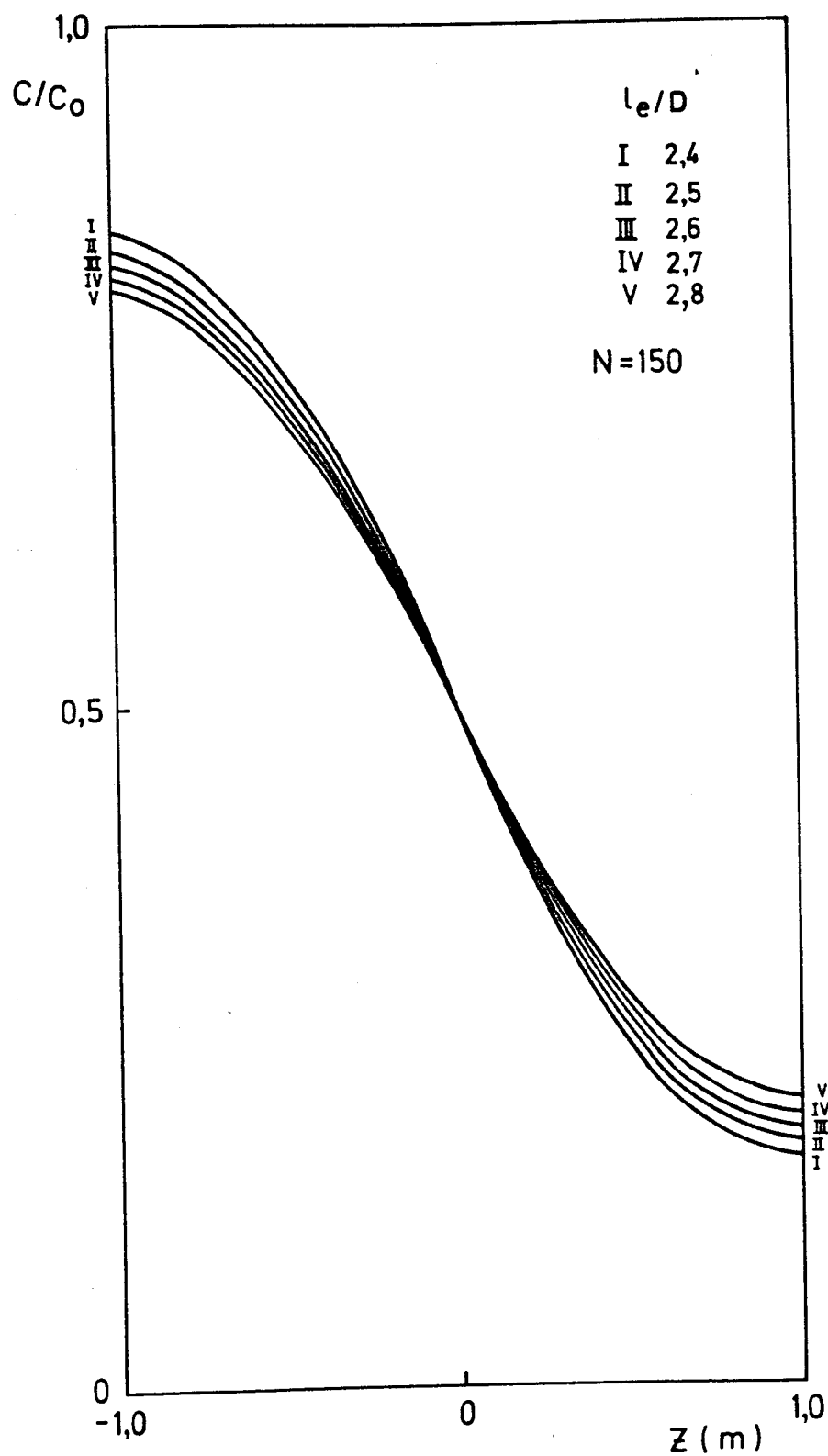


Figura 4.26 - Estudo da sensibilidade da mistura ao valor de l_e/D tomando $\alpha_T = 0,6$ para "slugs" com $\Delta H = 120$ mm; $D = 19$ mm.

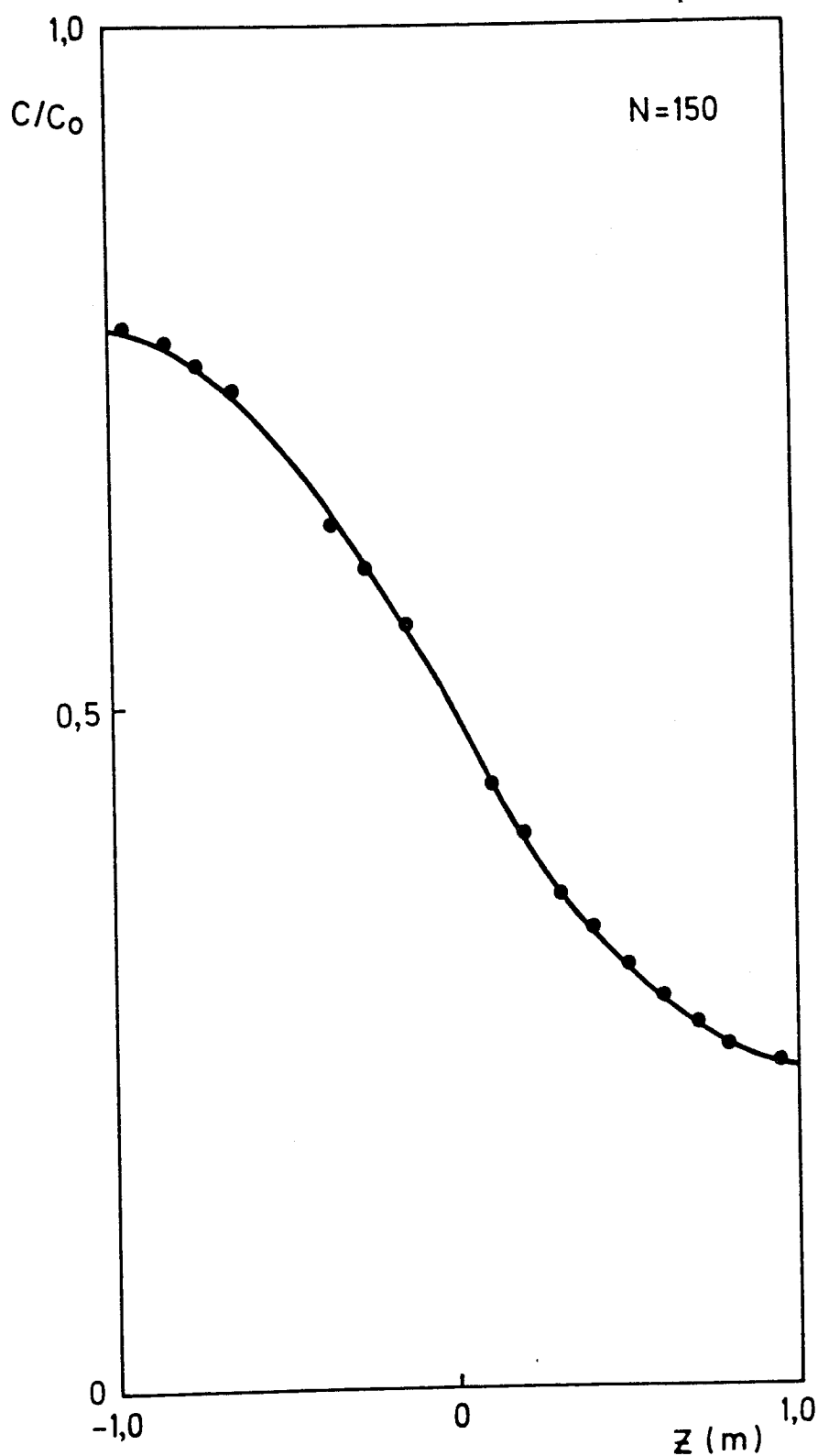


Figura 4.27 - Comparação entre os perfis experimentais e os obtidos por simulação tomando $\ell_e/D = 2,5$ e $\alpha_T = 0,7$ para "slugs" com $\Delta H = 120$ mm; $D = 19$ mm.

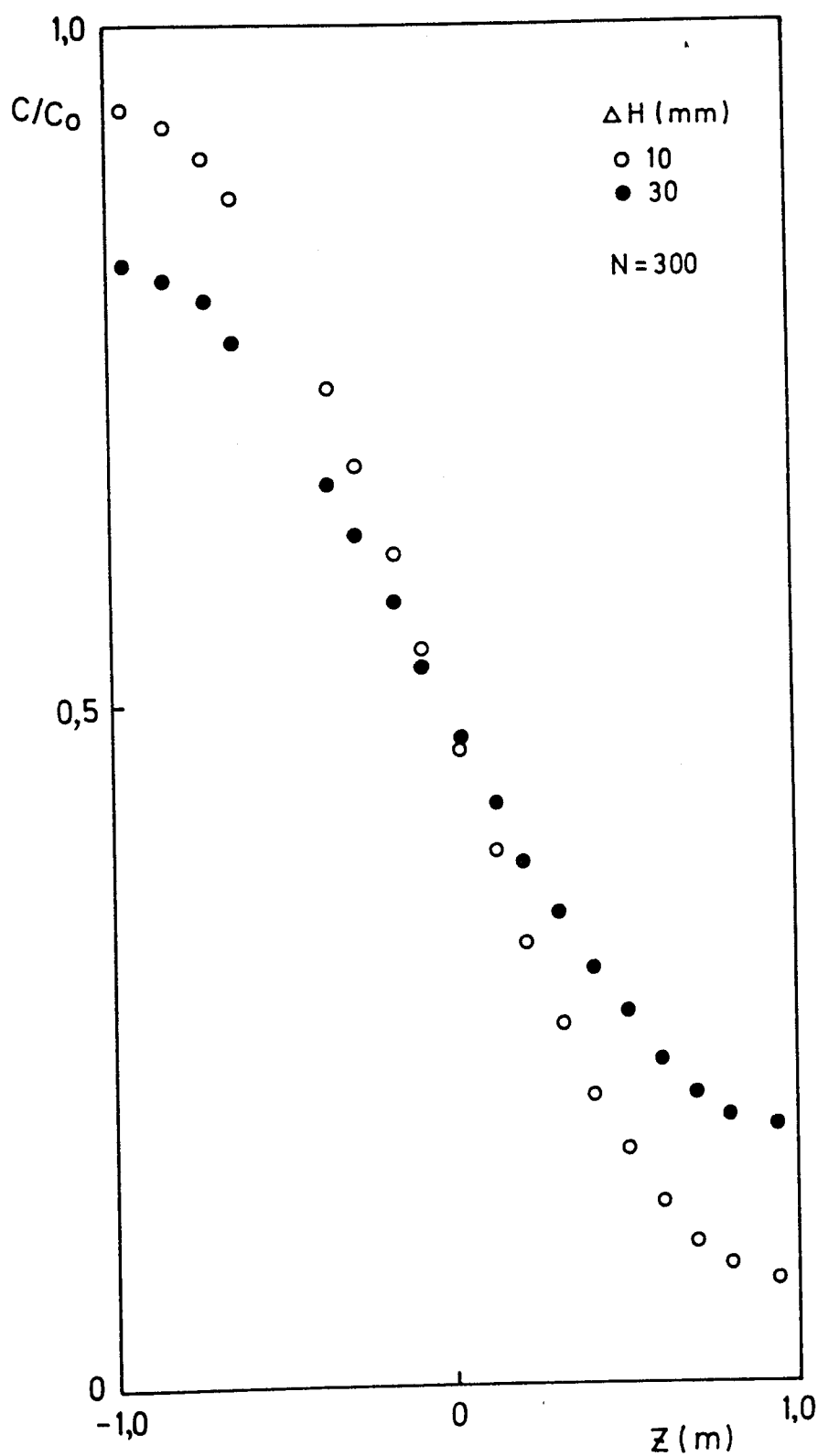


Figura 4,28 - Comparação entre os perfis experimentais obtidos com "slugs" de $\Delta H = 10$ e 30 mm ; $D = 19 \text{ mm}$.

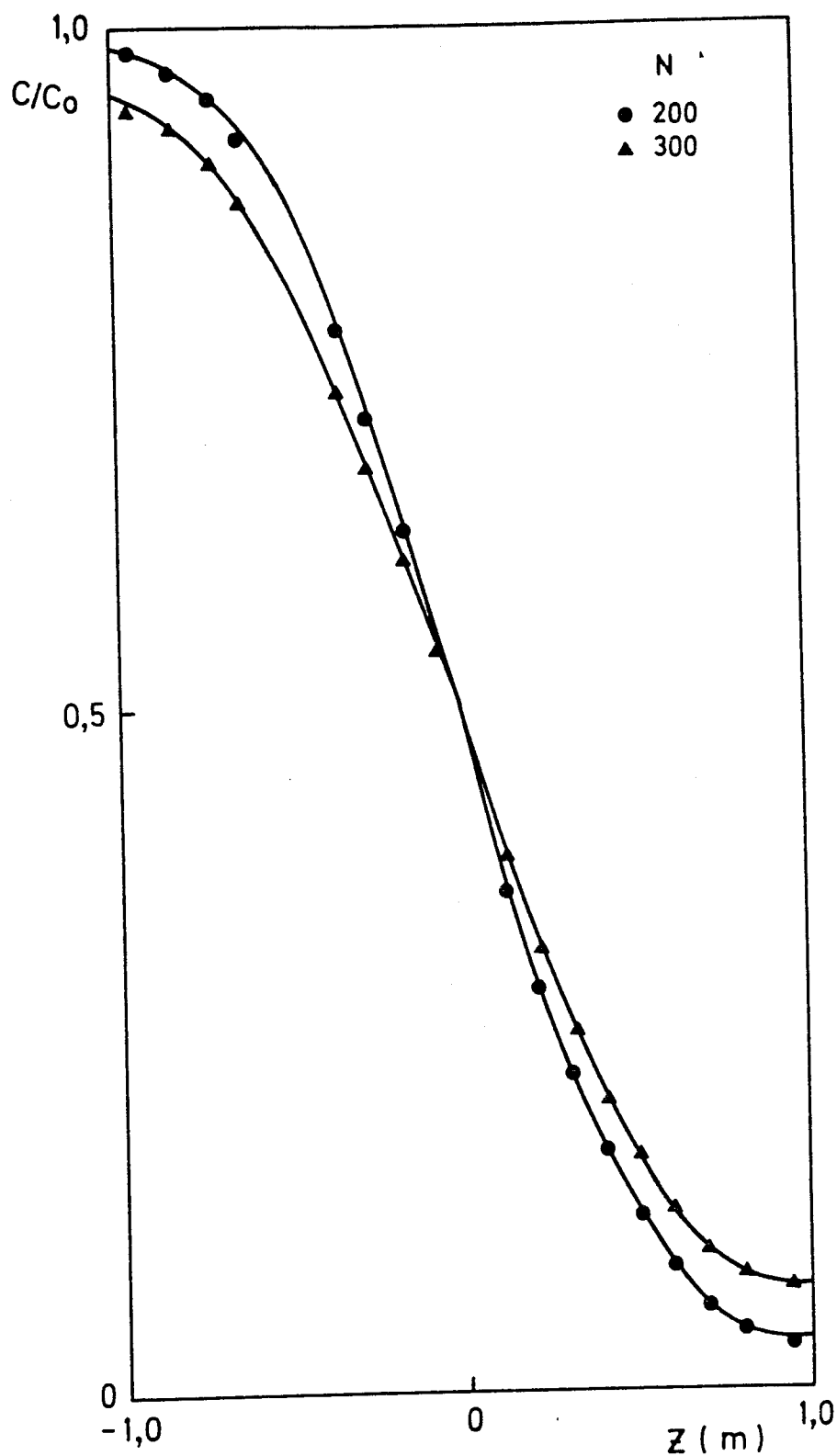


Figura 4.29 - Comparação entre os perfis experimentais e os obtidos por simulação tomando $\ell_e/D = 1,6$ e $\alpha_T = 0,7$ para "slugs" com $\Delta H = 10$ mm; $D = 19$ mm.

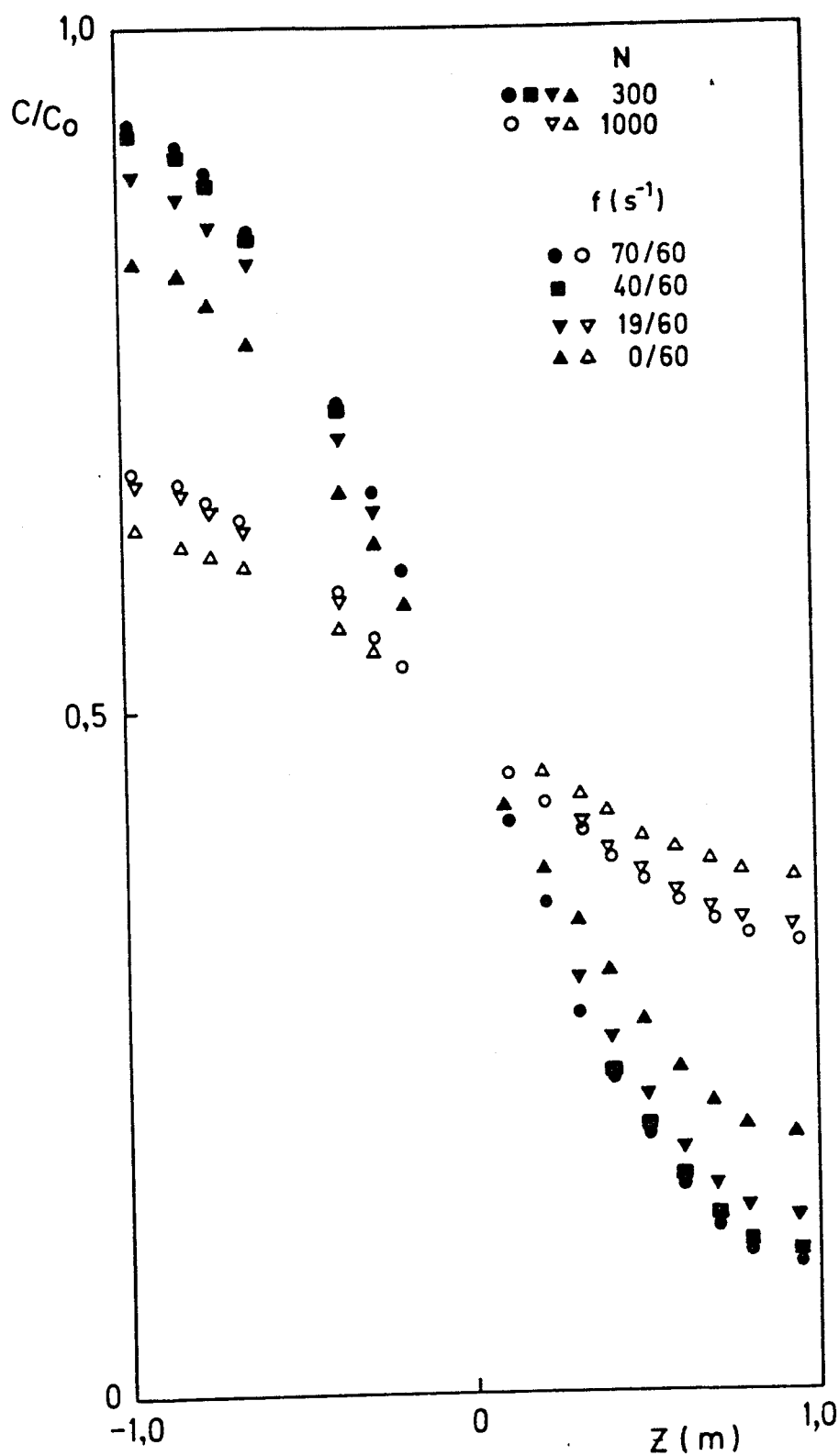


Figura 4.30 a - Comparação entre os perfis experimentais obtidos injectando "slugs" com $\Delta H = 30 \text{ mm}$ a diferentes cadências; $D = 19 \text{ mm}$.

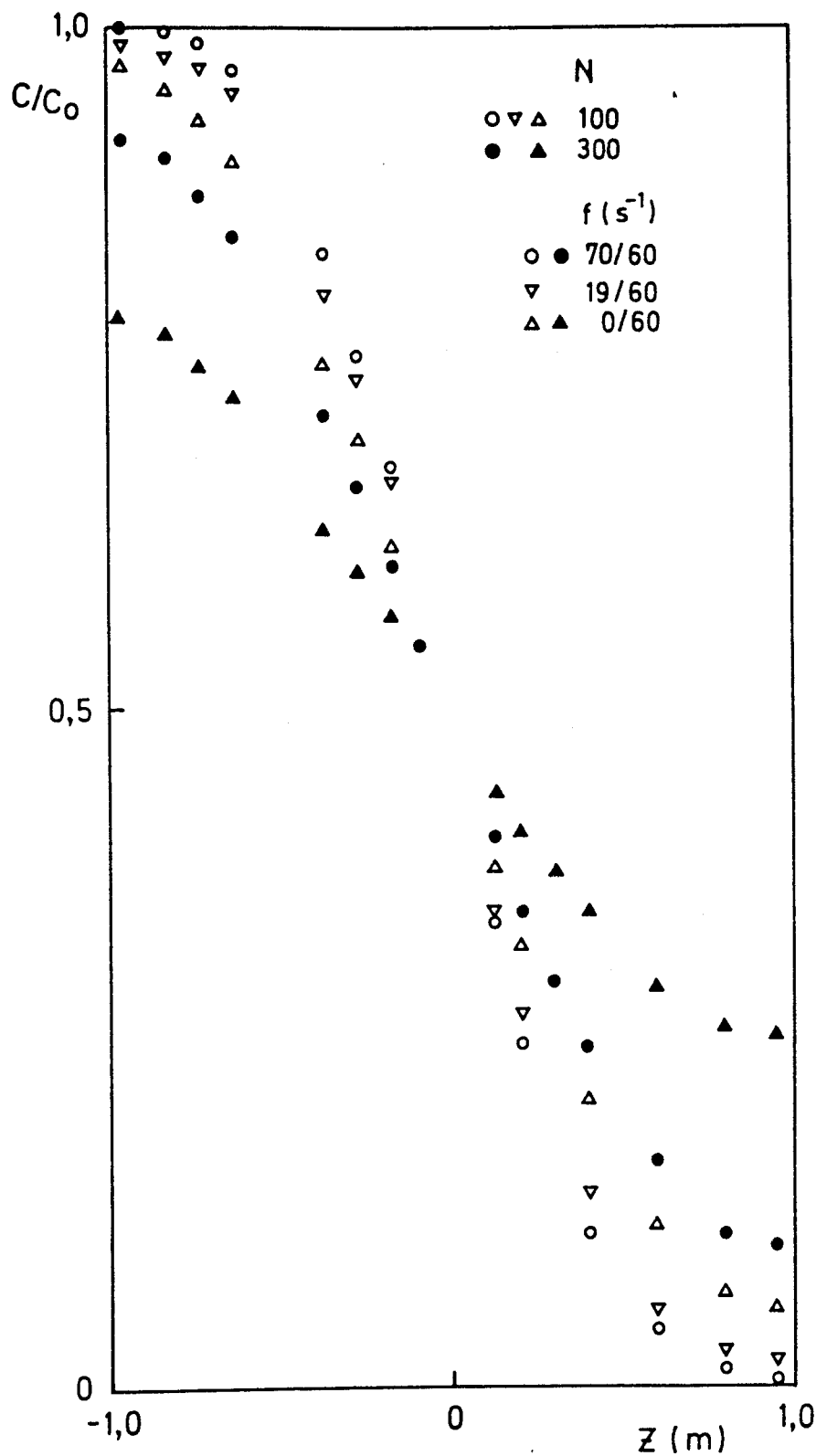


Figura 4.30 b - Comparação entre os perfis experimentais obtidos injectando "slugs" com $\Delta H = 60$ mm a diferentes cadências; $D = 19$ mm.

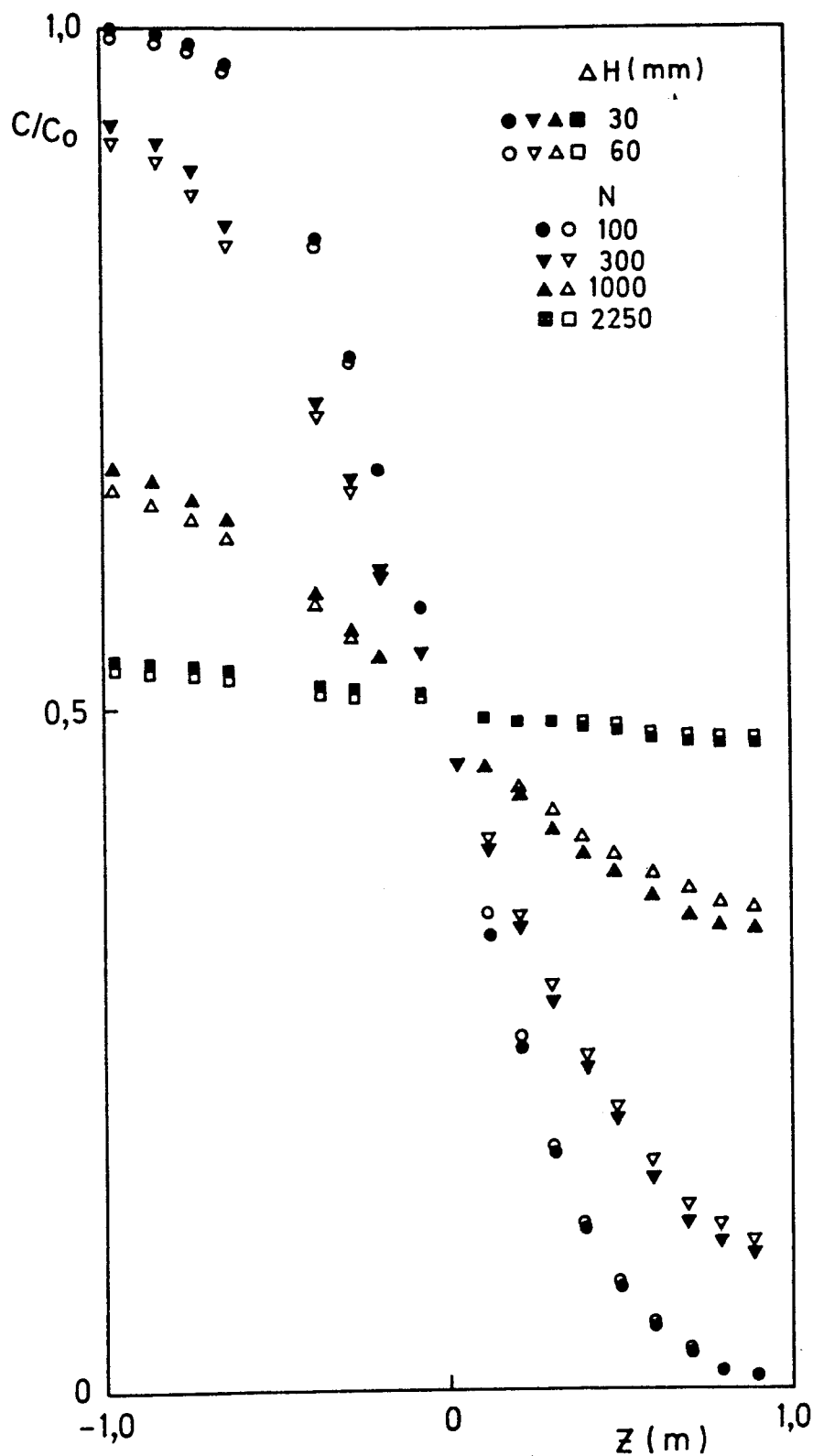


Figura 4.31 a - Comparação entre os perfis experimentais obtidos injectando "slugs" com $\Delta H = 30$ e 60 mm à cadência máxima ($f = 70/60 \text{ s}^{-1}$); $D = 19 \text{ mm}$.

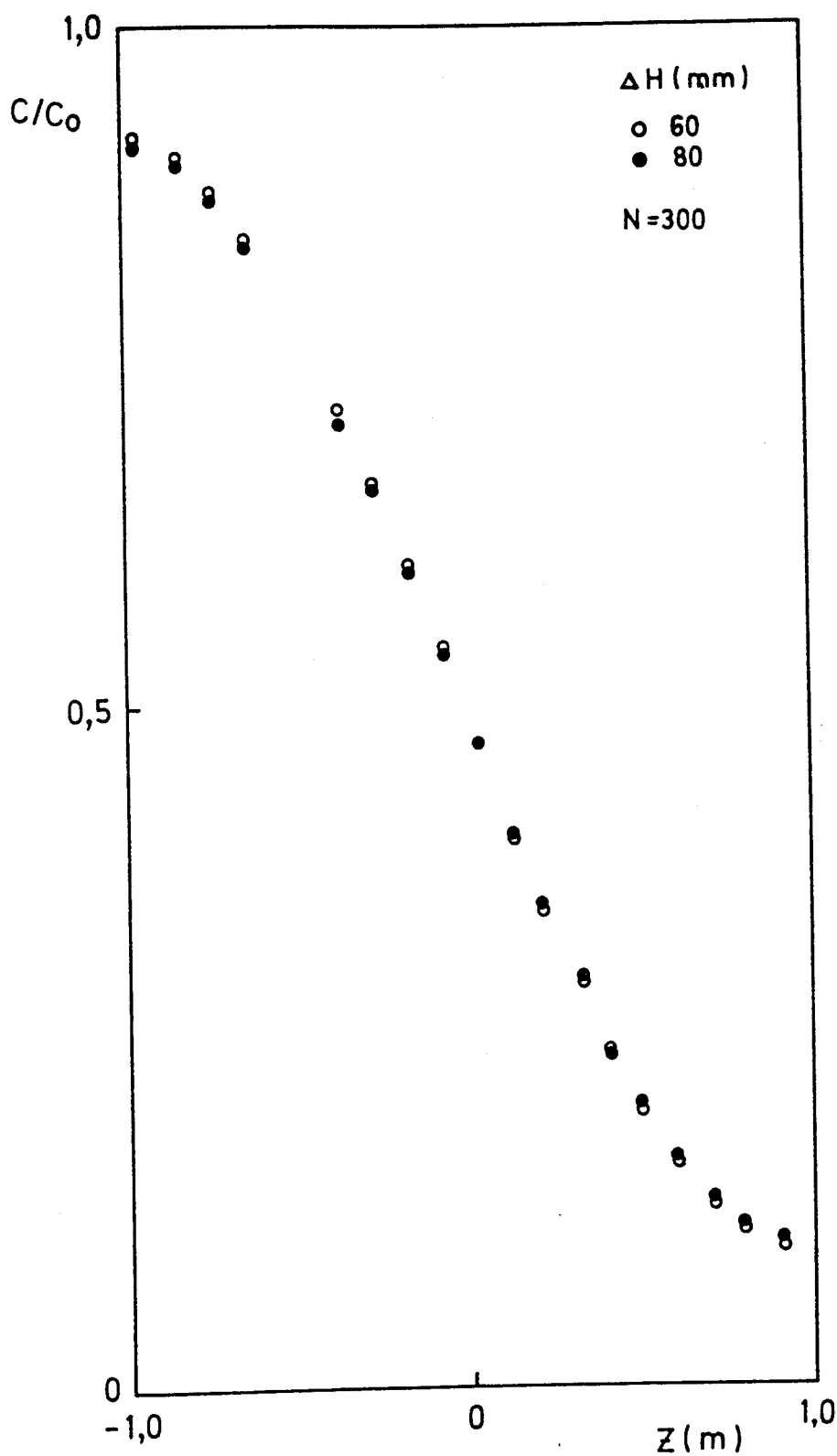


Figura 4.31 b - Comparação entre os perfis experimentais obtidos injectando "slugs" com $\Delta H = 60$ e 80 mm à cadência máxima ($f = 70/60 \text{ s}^{-1}$); $D = 19$ mm.

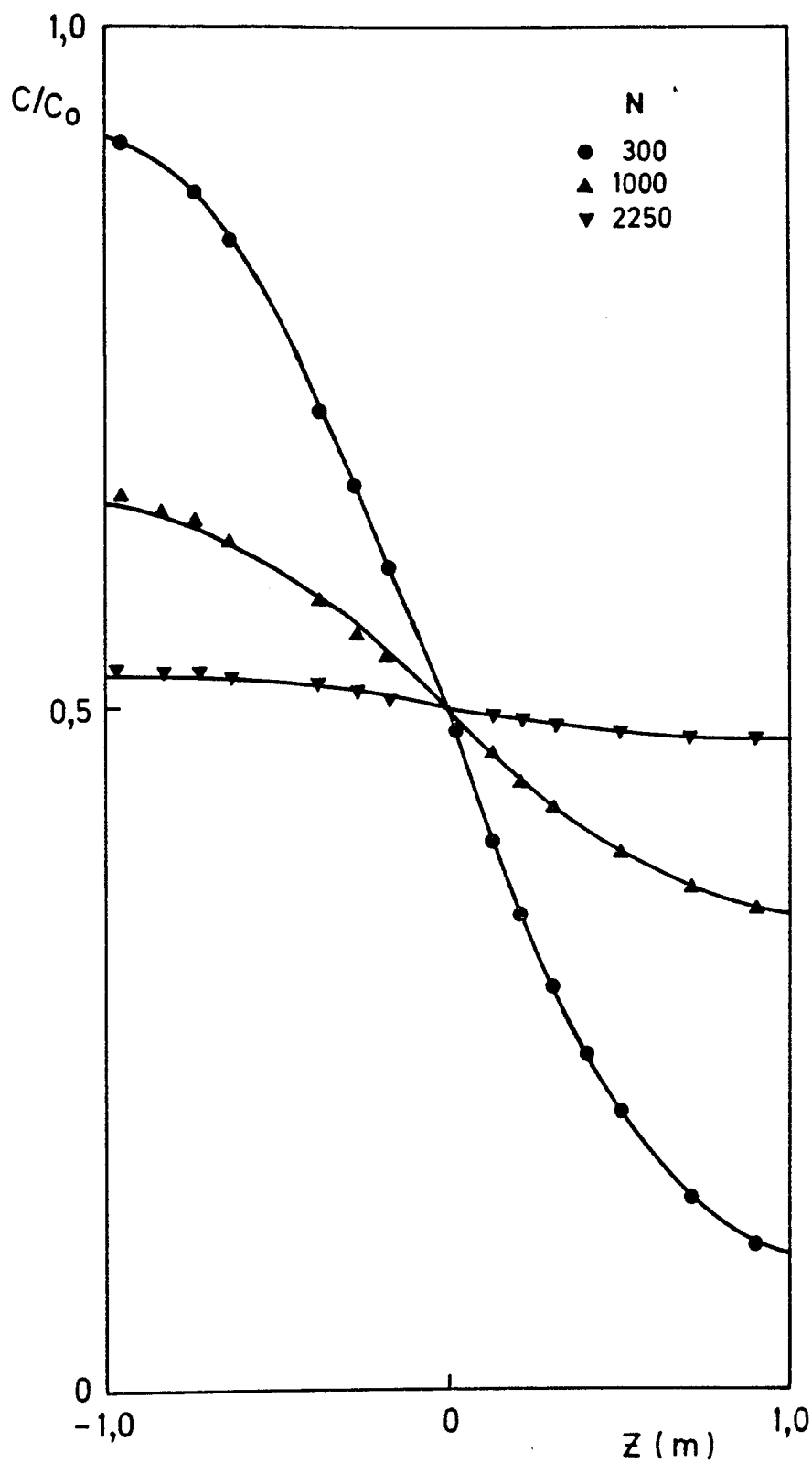


Figura 4.32 a - Comprimento da esteira que melhor ajusta os resultados experimentais obtidos com cadência máxima ($f = 70/60 \text{ s}^{-1}$); $D = 19 \text{ mm}$; $\ell_e/D = 1,8$.

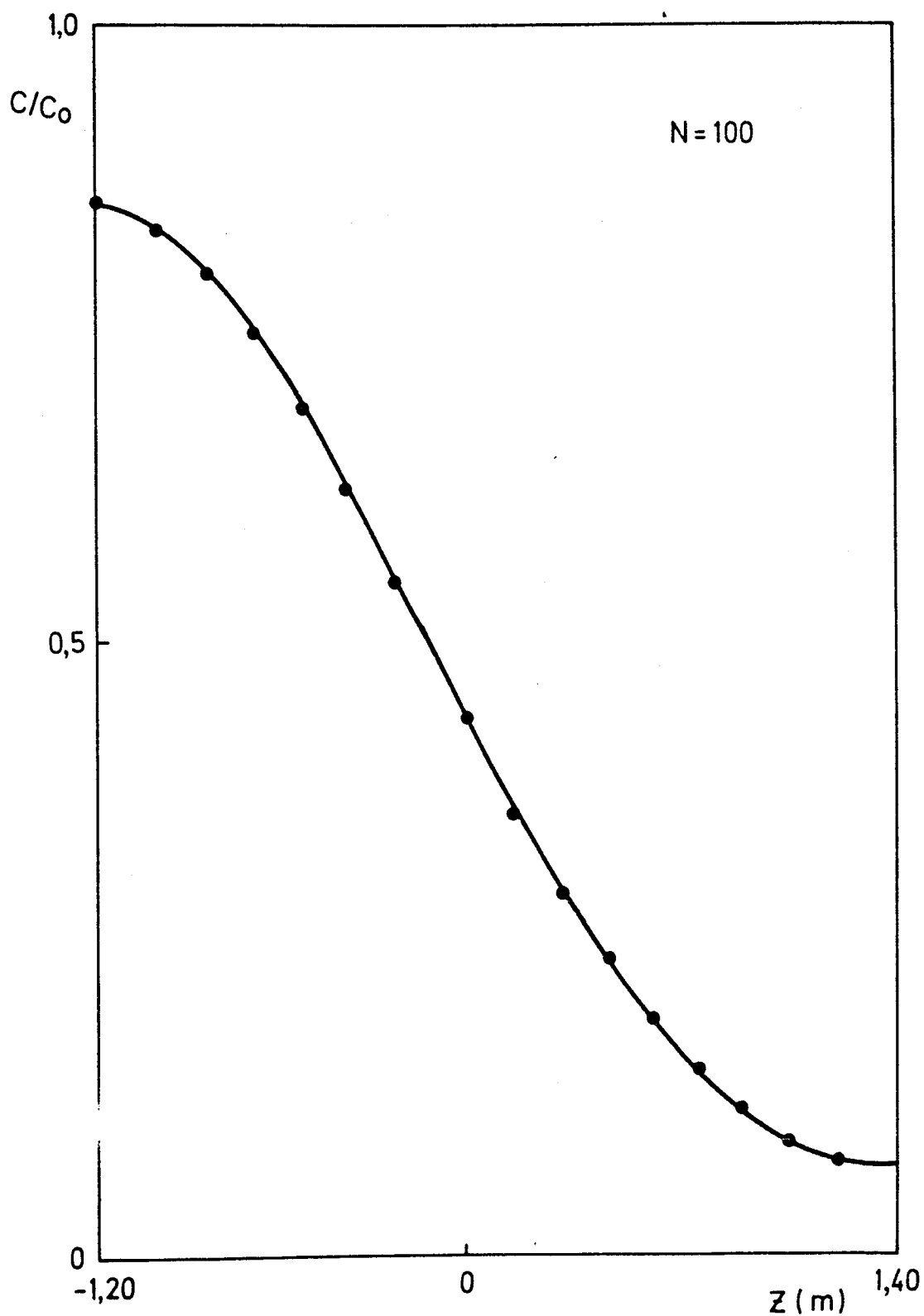


Figura 4.32 b - Comprimento da esteira que melhor ajusta os resultados experimentais obtidos com cadência máxima ($f = 35/60 \text{ s}^{-1}$); $D = 32 \text{ mm}$, $\lambda_e/D = 2,5$.

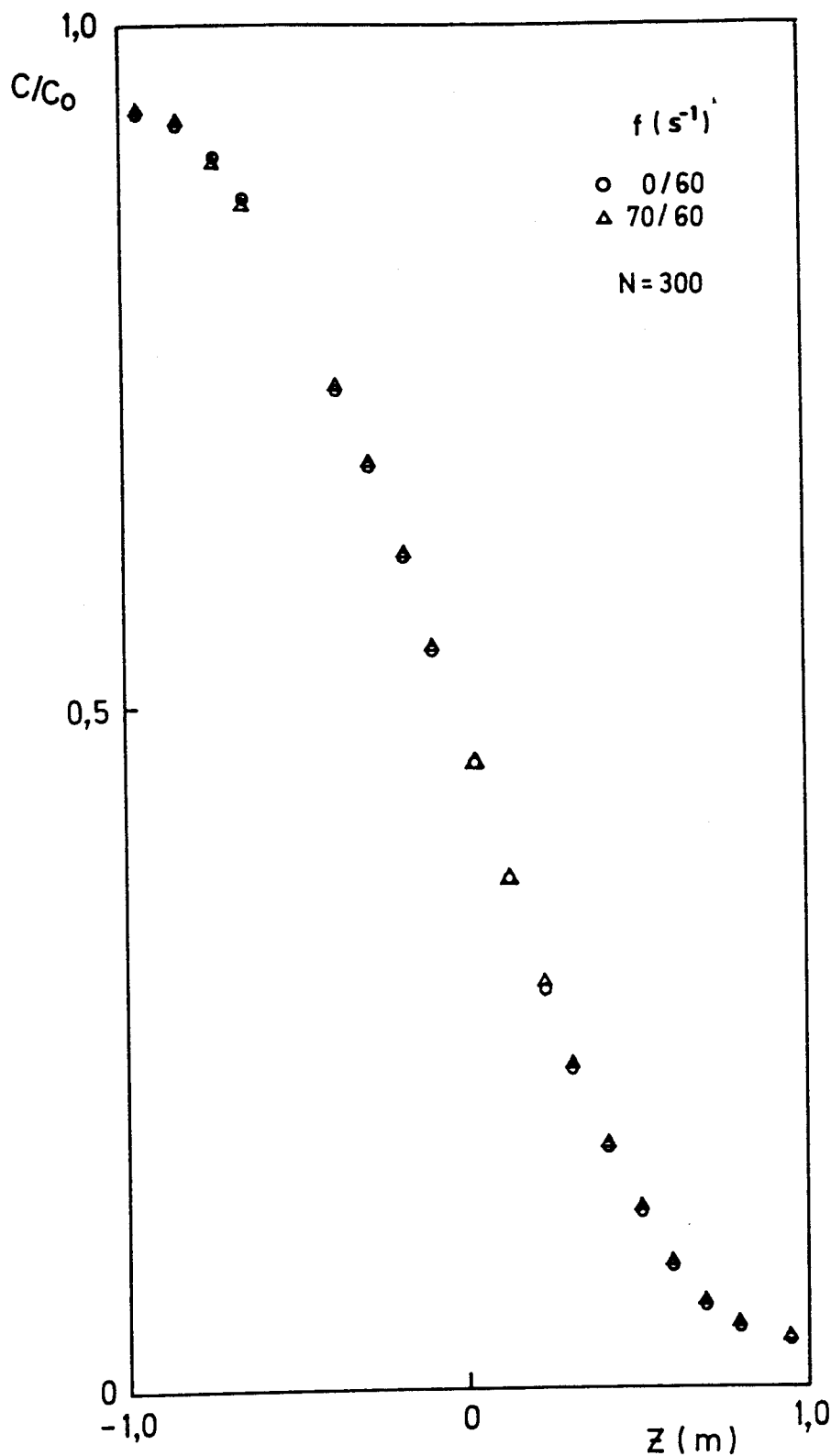


Figura 33 a - Comparação entre os perfis experimentais obtidos injectando "slugs" com $\Delta H = 10 \text{ mm}$ a uma cadência máxima ($70/60 \text{ s}^{-1}$) e isoladamente ($0/60 \text{ s}^{-1}$); $D = 19 \text{ mm}$.

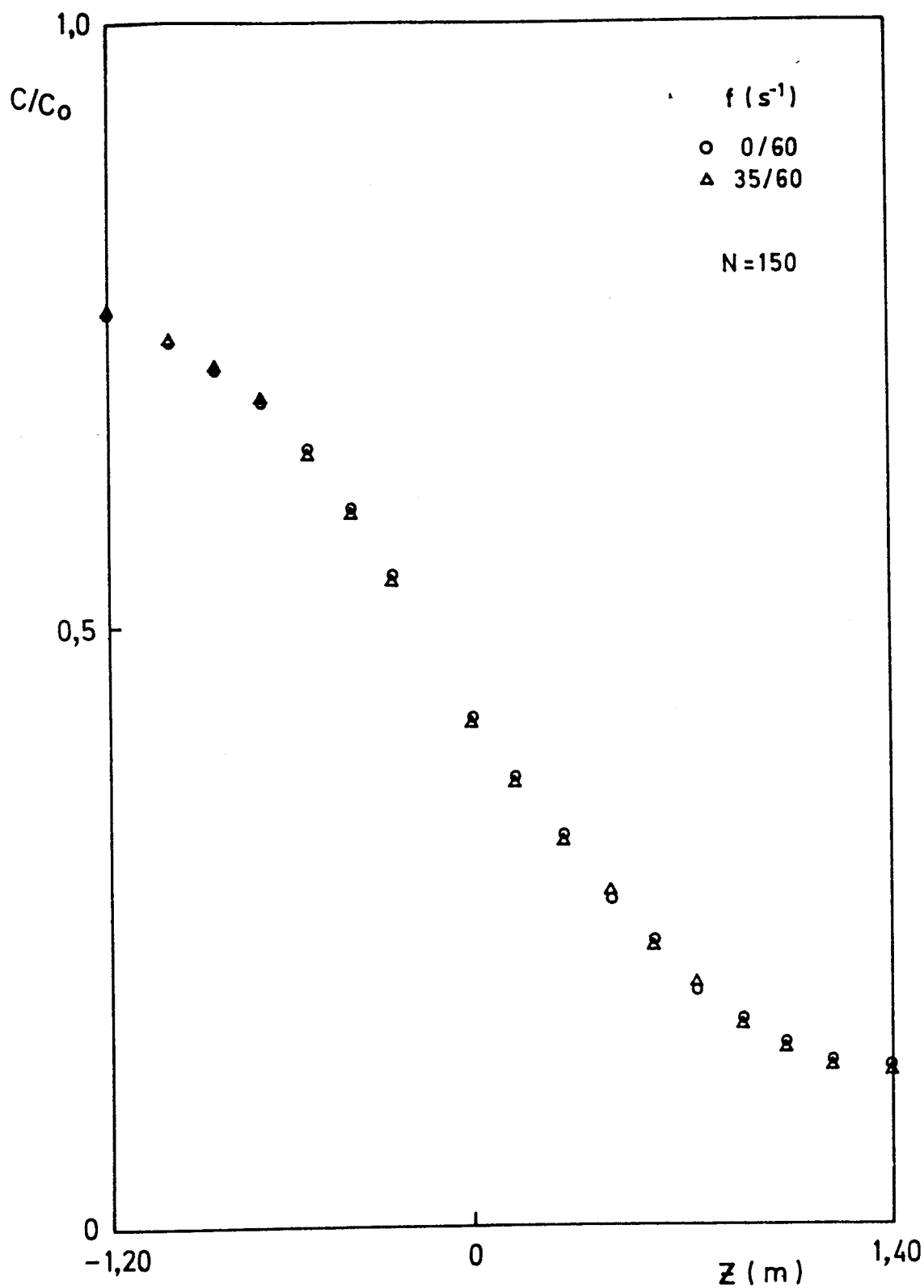


Figura 4.33 b - Comparação entre os perfis experimentais obtidos injectando "slugs" com $\Delta H = 10 \text{ mm}$ a uma cadência máxima ($35/60 \text{ s}^{-1}$) e isoladamente ($0/60 \text{ s}^{-1}$); $D = 32 \text{ mm}$.

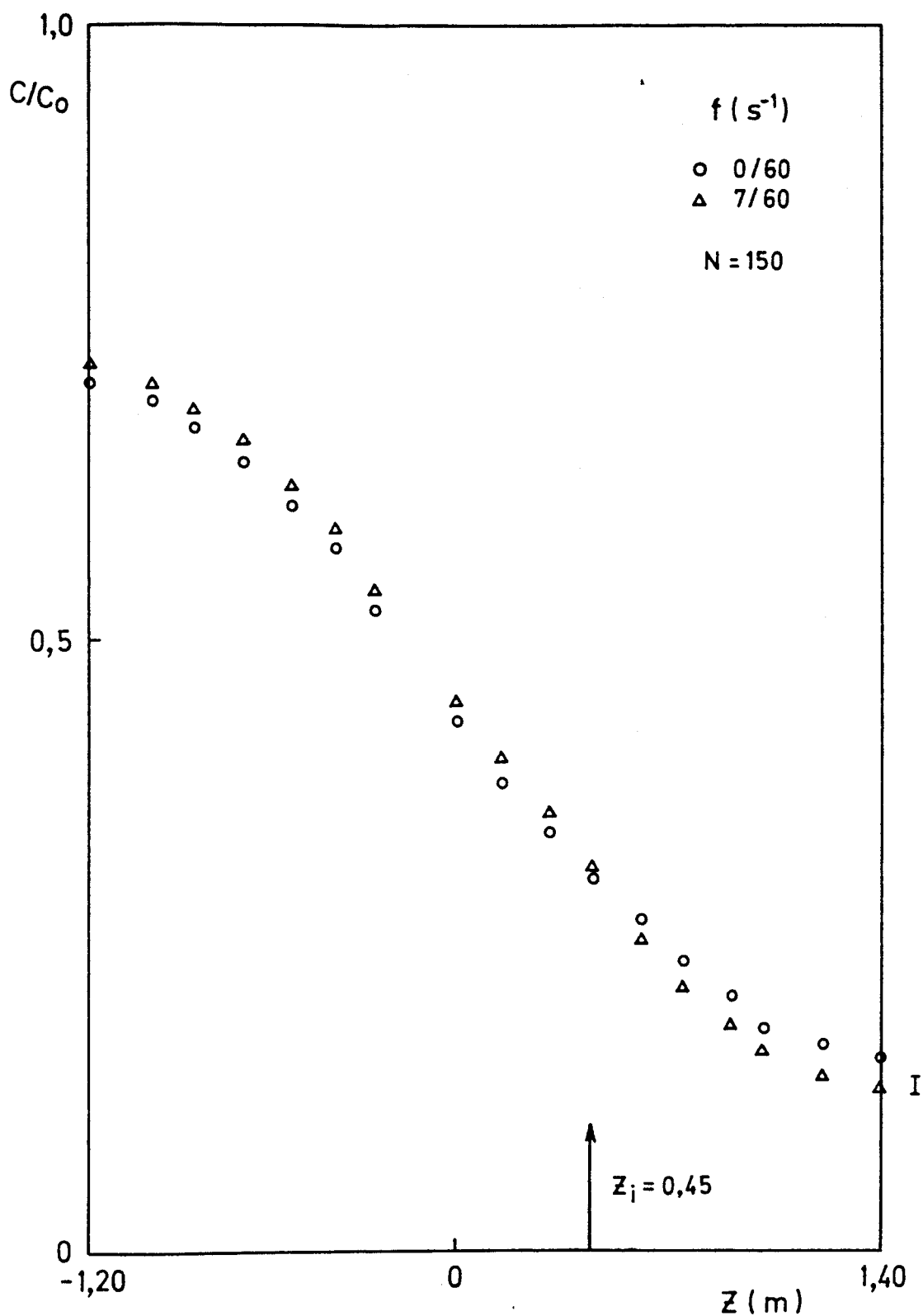


Figura 4.34 a - Comparação entre os perfis experimentais obtidos injectando "slugs" com $\Delta H = 60 \text{ mm}$ de tal forma que um "slug" é injectado no instante em que o anterior atinge a cota $z_i = 0,45 \text{ m}$ e injectando isoladamente; $D = 32 \text{ mm}$.

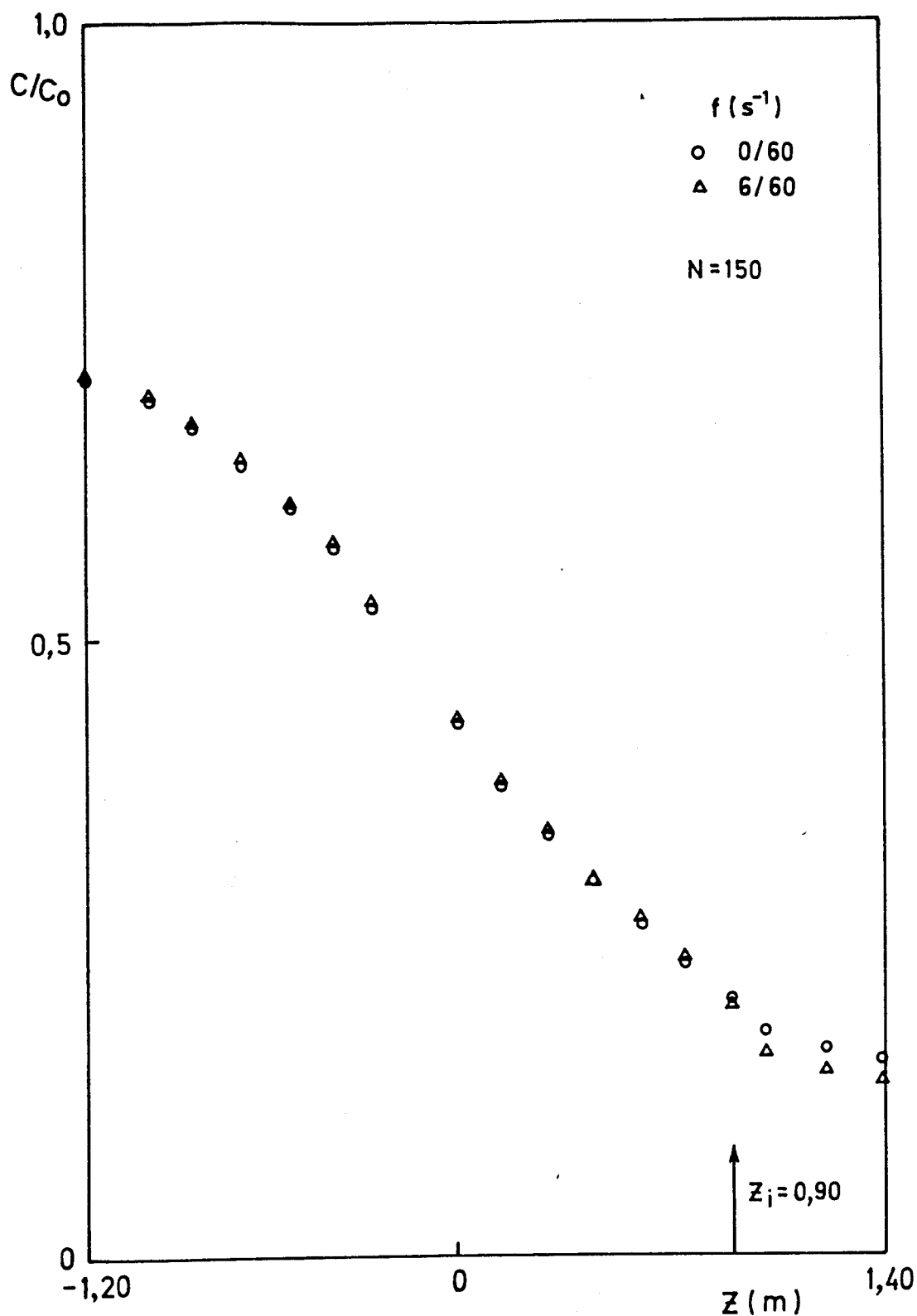


Figura 4.34 b - Comparação entre os perfis experimentais obtidos injectando "slugs" com $\Delta H = 60$ mm de tal forma que um "slug" é injectado no instante em que o anterior atinge a cota $z_i = 0,90$ m e injectando isoladamente; $D = 32$ mm.

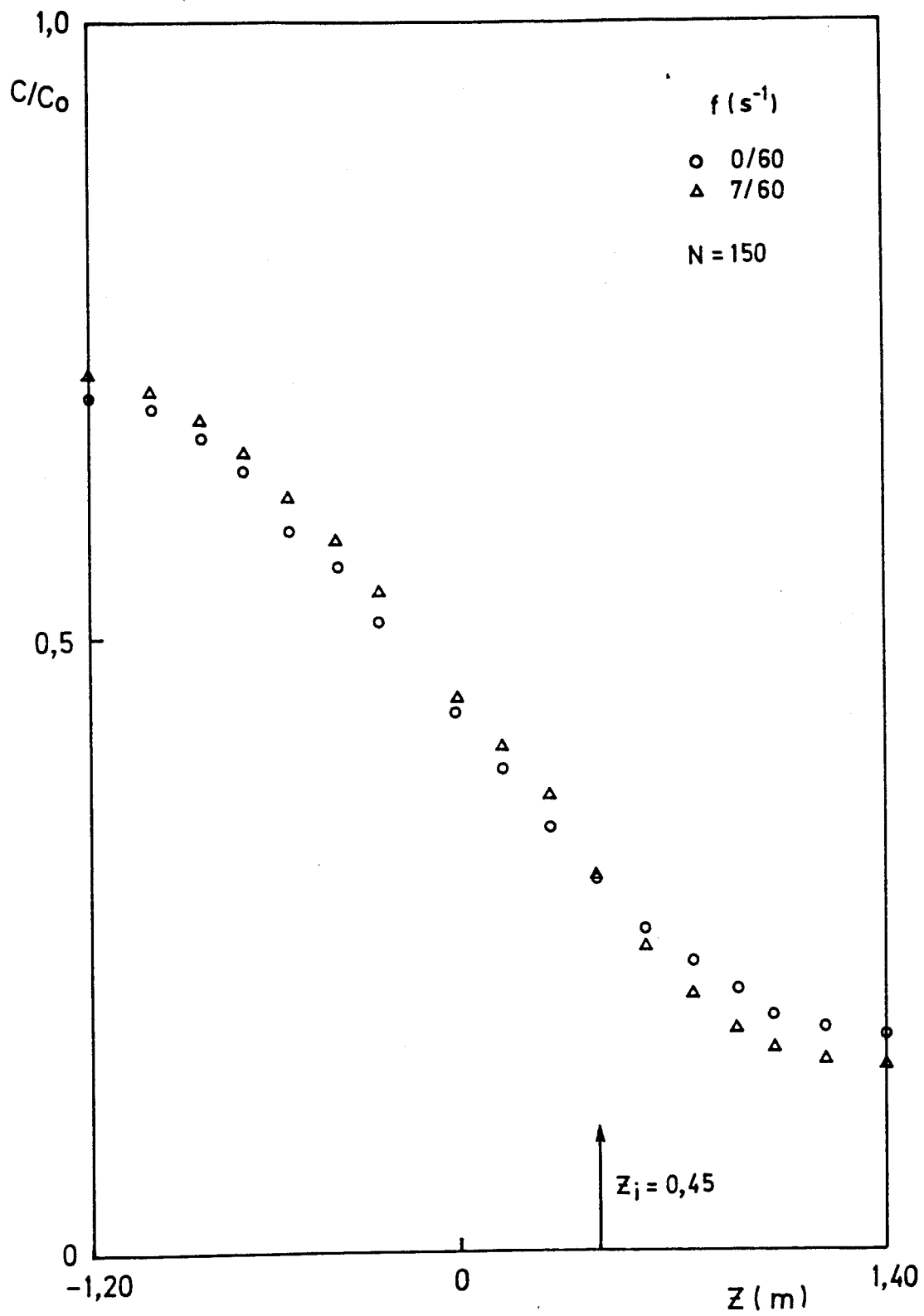


Figura 4.34 c - Perfis experimentais obtidas injectando "slugs" com $\Delta H = 30 \text{ mm}$ de tal forma que um "slug" é injectado no instante em que o anterior atinge a cota $z_i = 0,45 \text{ m}$ e injectando isoladamente; $D = 32 \text{ mm}$.

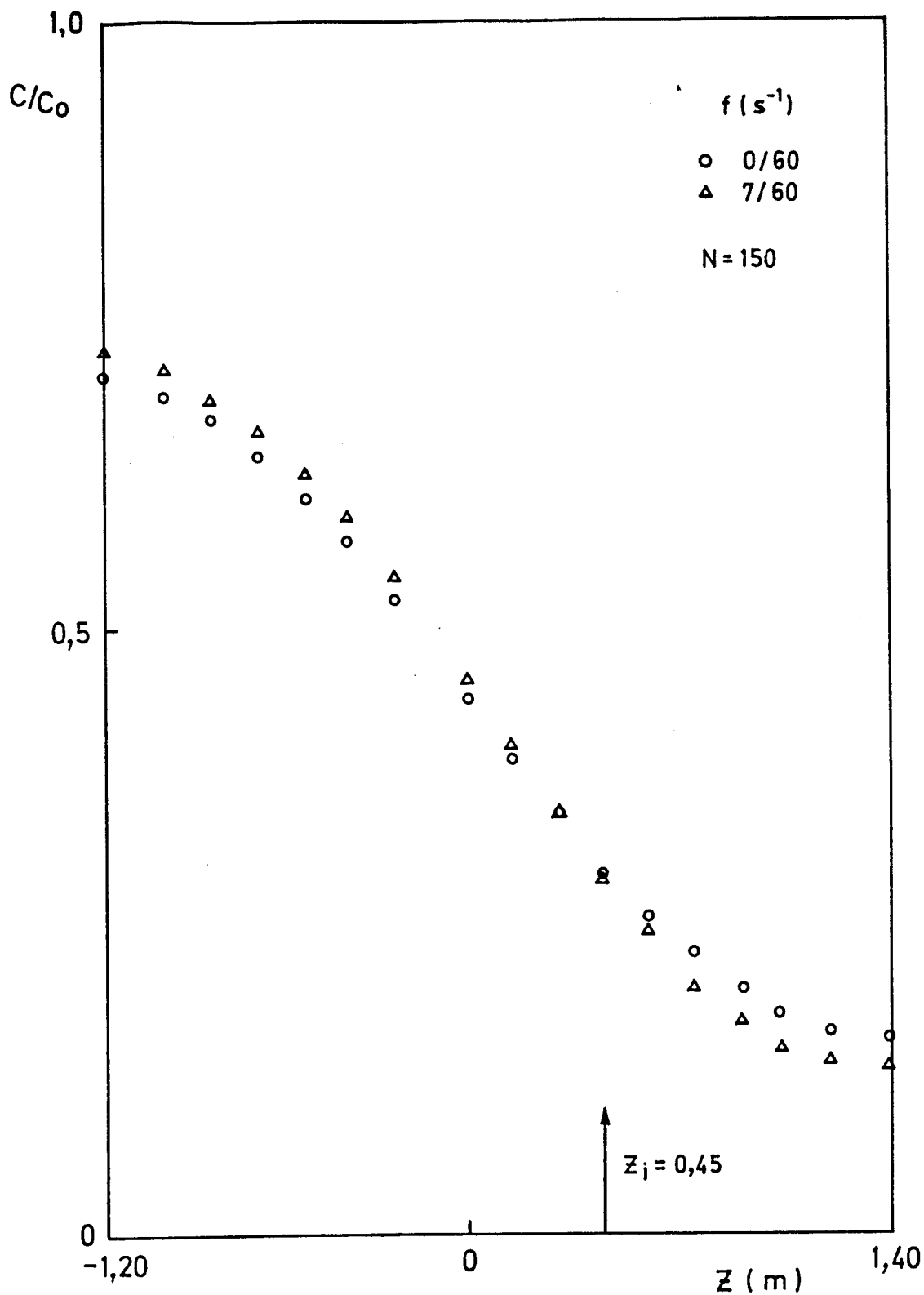


Figura 34 d - Comparação entre os perfis experimentais obtidos injectando "slugs" com $\Delta H = 90$ mm de tal forma que um "slug" é injectado no instante em que o anterior atinge a cota $z_i = 0,45$ m e injectando isoladamente; $D = 32$ mm.

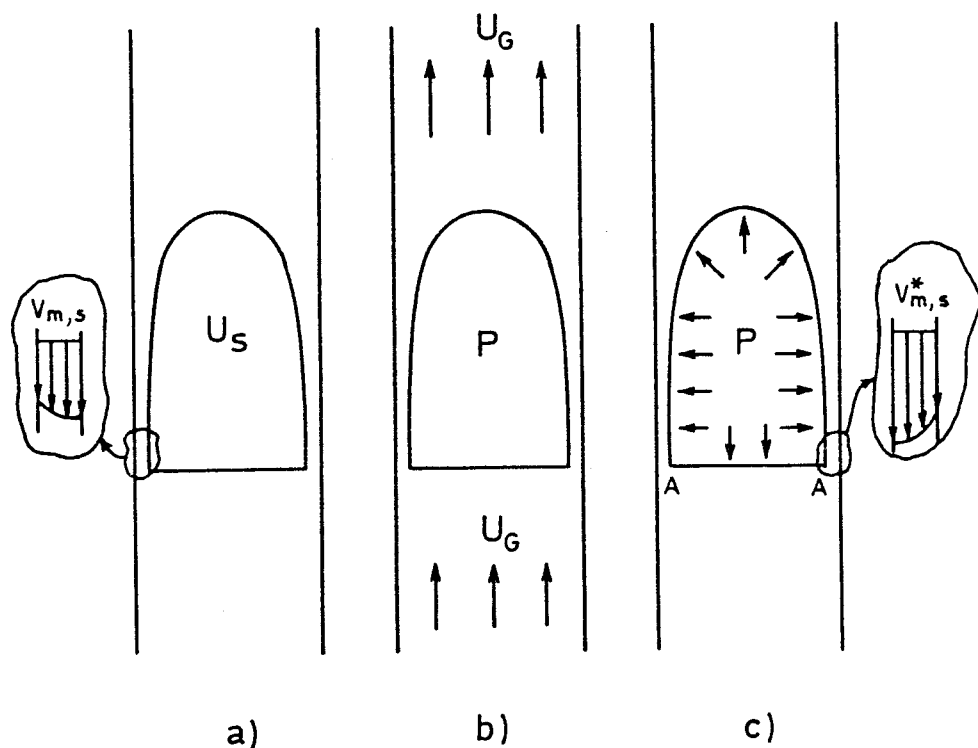


Figura 4.35 - a) Esquema da velocidade relativa de mergulho da película lateral na base de um "slug" a subir isolado na coluna, $v_{m,s}$; b) Esquema da velocidade média absoluta de subida do líquido na coluna durante a injeção de um novo "slug"; c) Esquema da velocidade relativa de mergulho da película lateral na base de um "slug" durante a injeção de um novo "slug", $v_{m,s}^*$.

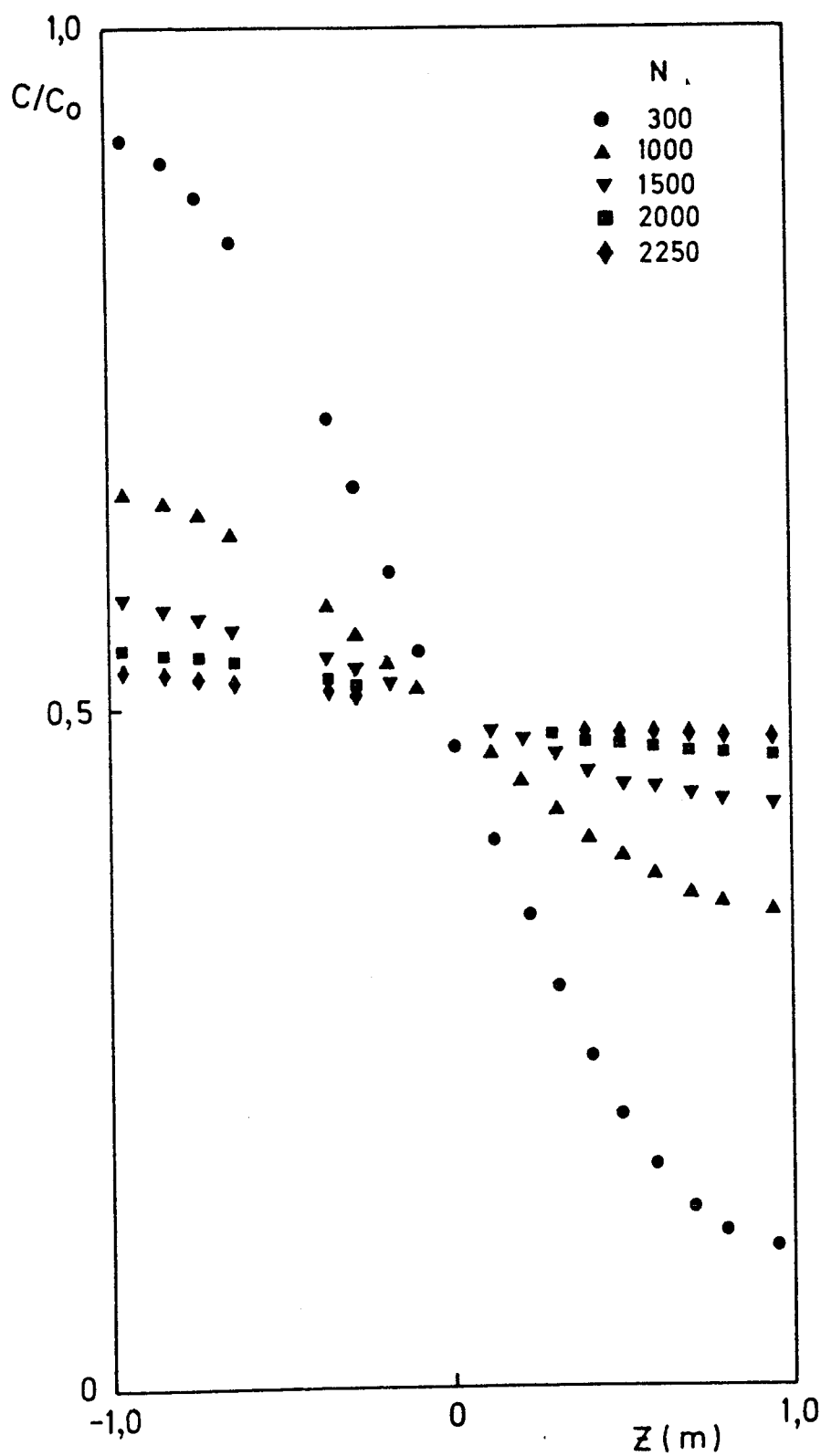


Figura 4.36 - Número de "slugs" necessários para homogeneizar uma coluna de água com uma distribuição inicial de corante em "degrau"; $D = 19$ mm, $\Delta H = 60$ mm, $f = 70/60$ s⁻¹.

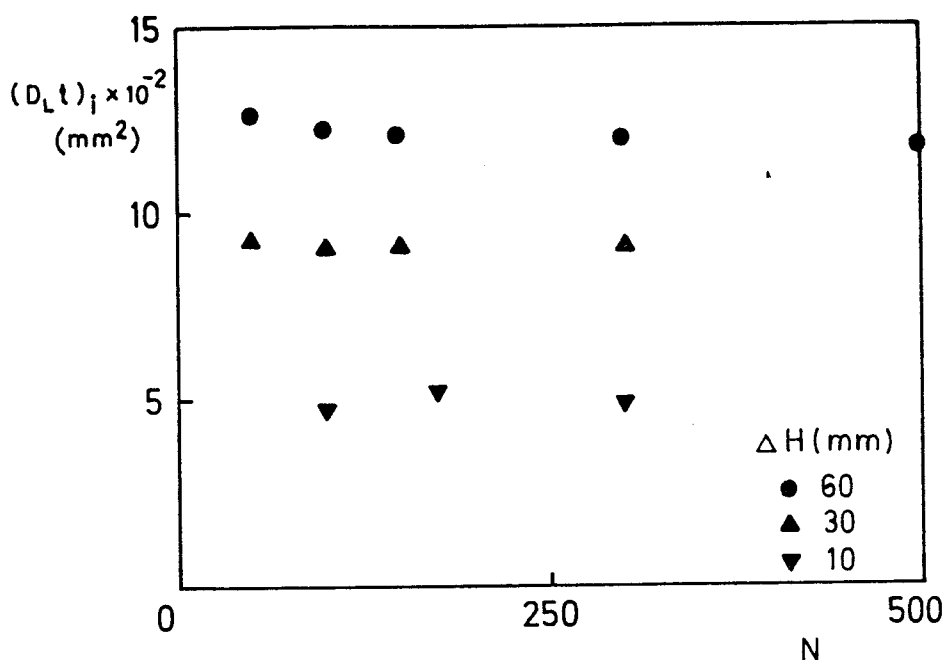


Figura 4.37 a - Valores de $(D_L t)_i$ vs. N obtidos por ajuste da equação (4.30) aos valores experimentais observados numa coluna de 19 mm.

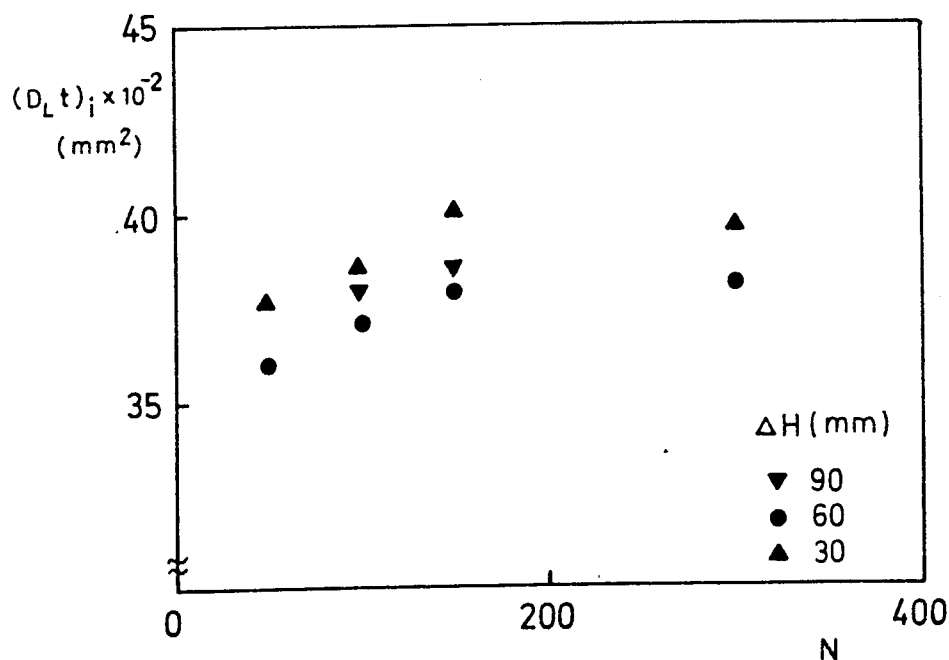


Figura 4.37 b - Valores de $(D_L t)_i$ vs. N obtidos por ajuste da equação (4.30) aos valores experimentais observados numa coluna de 32 mm.

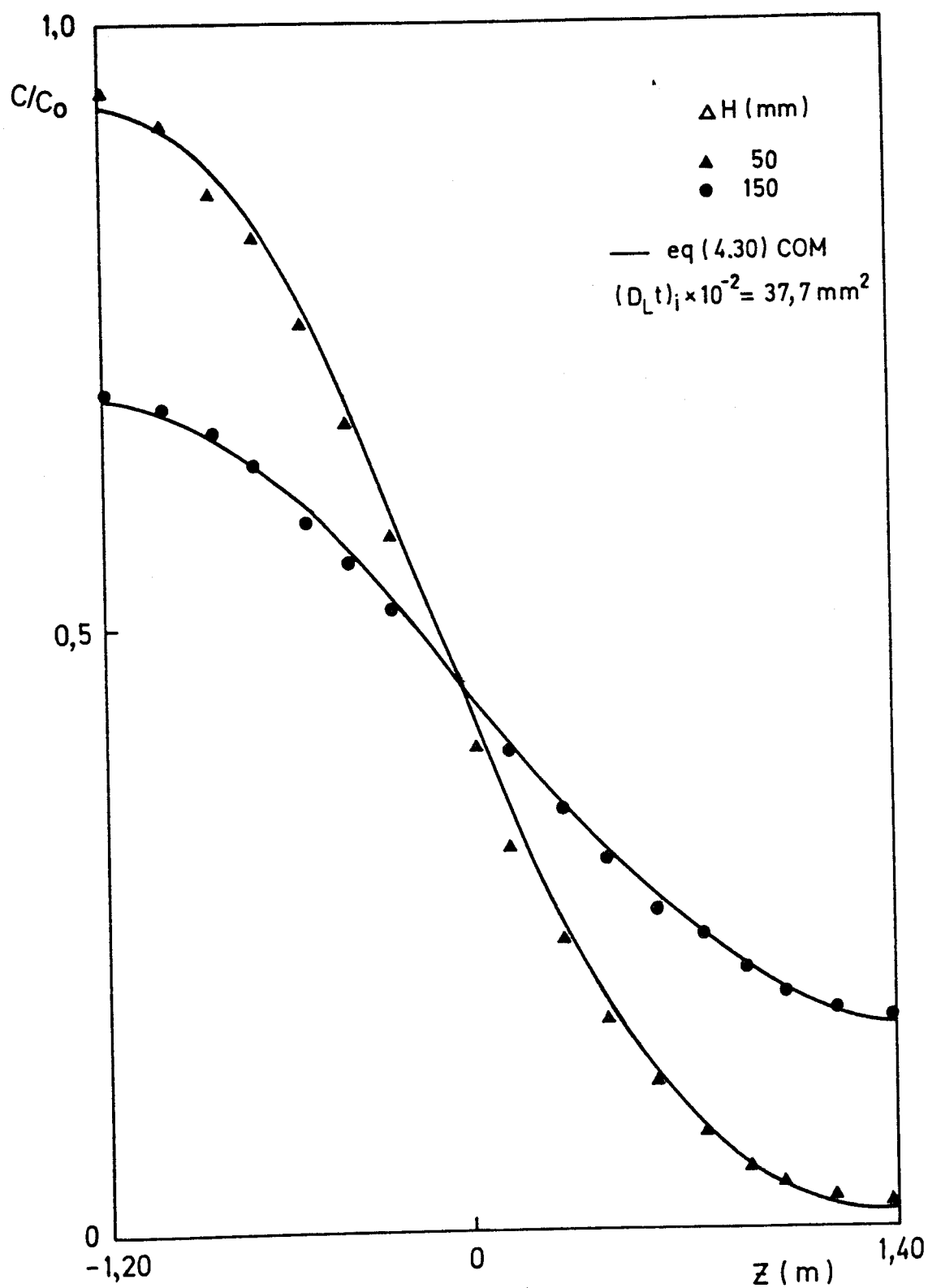


Figura 4.38 - Exemplo do ajuste da equação (4.30) aos valores experimentais; $D = 32 \text{ mm}$; $\Delta H = 30 \text{ mm}$.

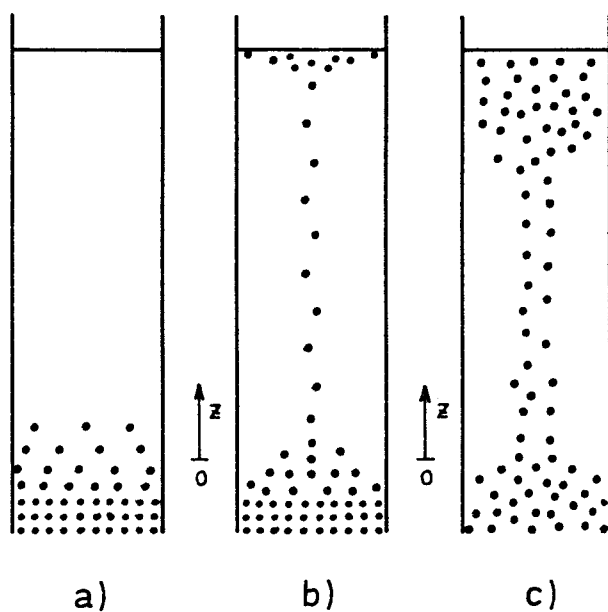


Figura 5.1 - a) Distribuição de corante após passagem de um "slug" numa coluna de água; b) Distribuição após a passagem de um "slug" numa coluna de um líquido viscoso; c) Distribuição após passagem de vários "slugs" numa coluna de um líquido viscoso.

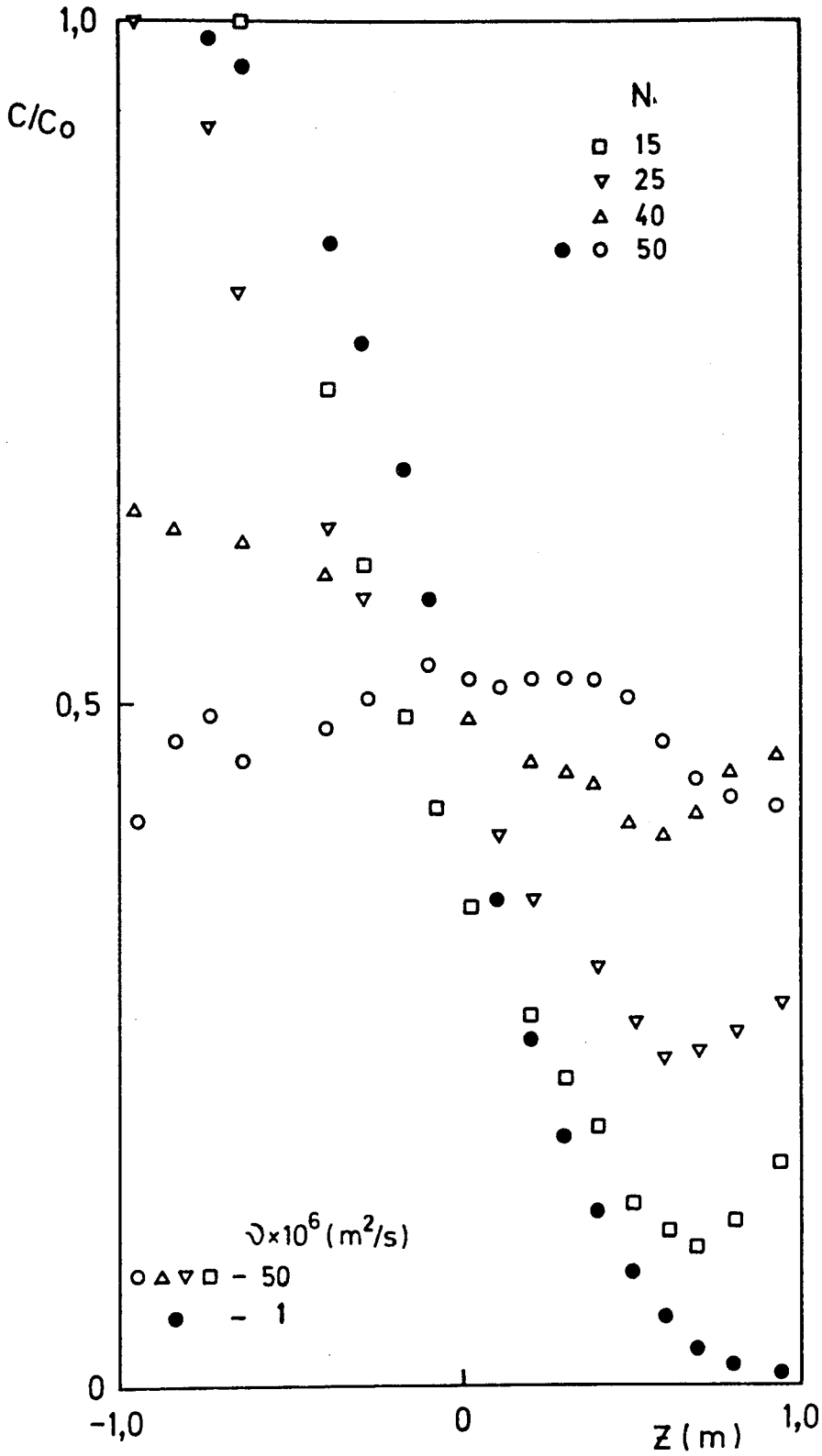


Figura 5.2 - Perfis de concentração experimentais obtidos por passagem de "slugs" num líquido com $\nu = 50 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; comparação com os obtidos em água; $D = 19 \text{ mm}$; $\Delta H = 60 \text{ mm}$.

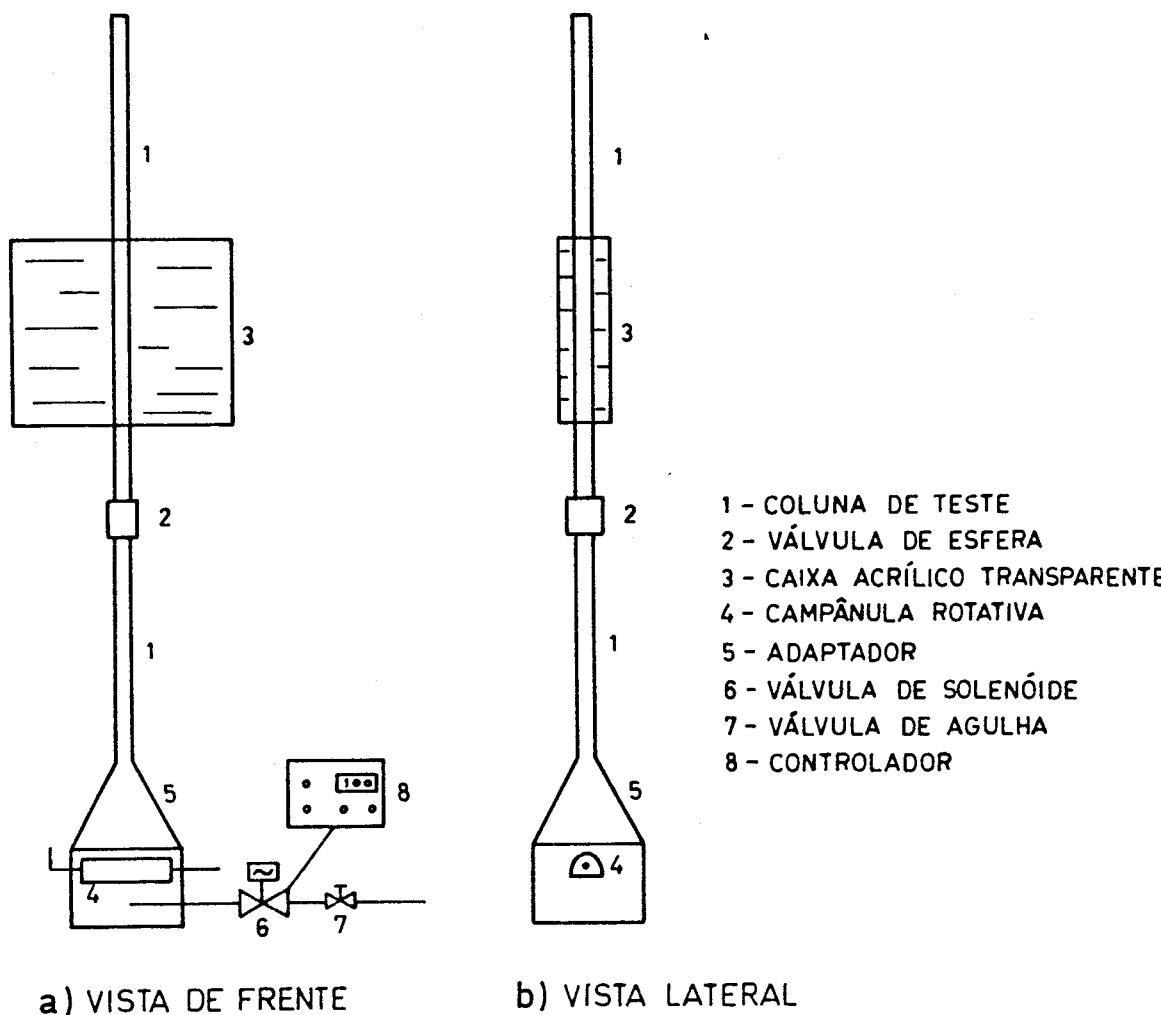


Figura 5.3 - Representação esquemática da instalação experimental usada para obtenção de fotografias instantâneas: a) vista de frente; b) vista lateral.

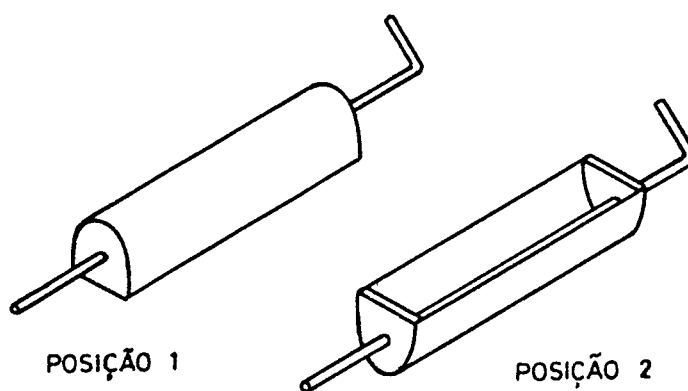


Figura 5.4 - Campânula utilizada para formação dos "slugs".

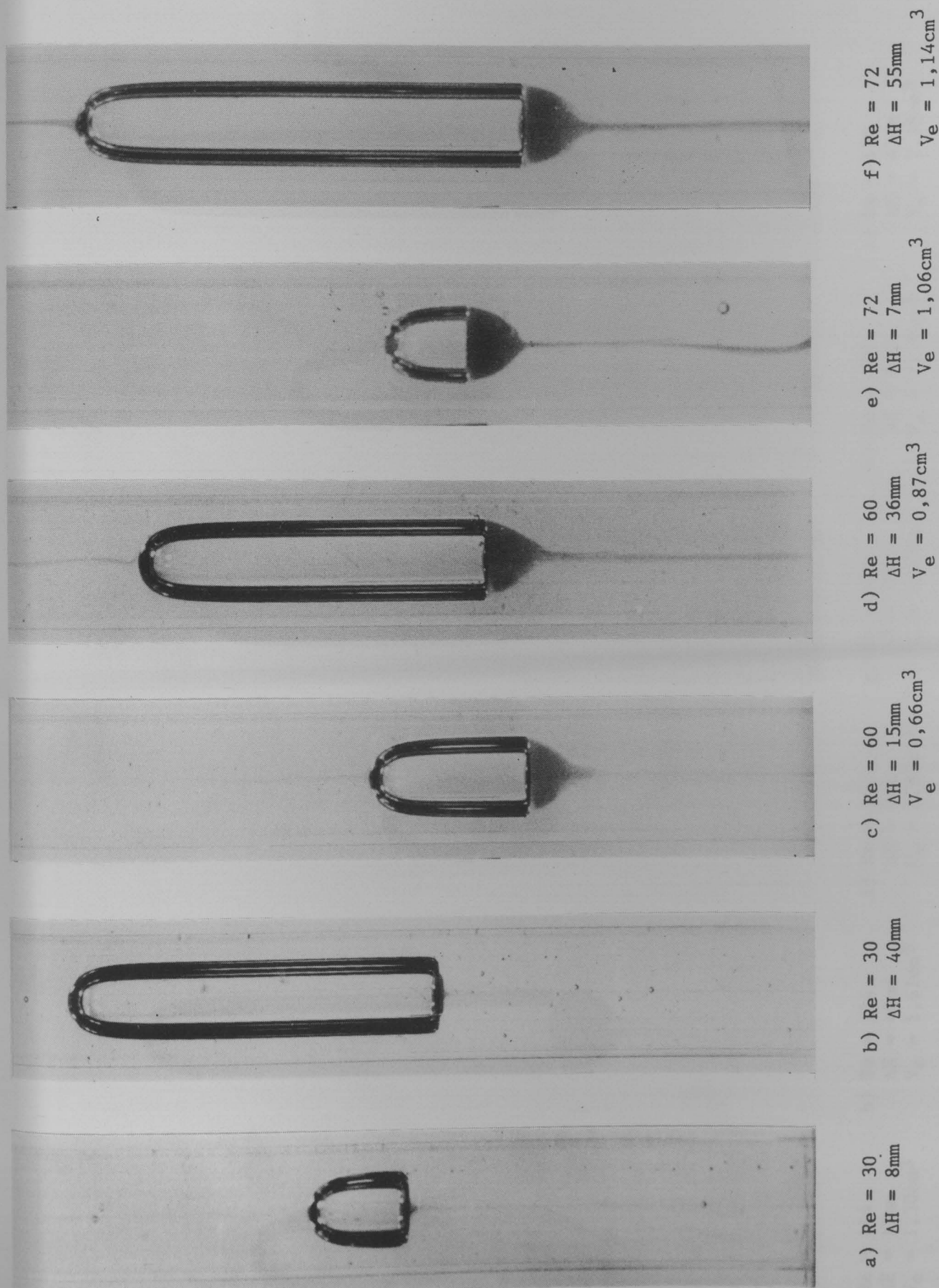
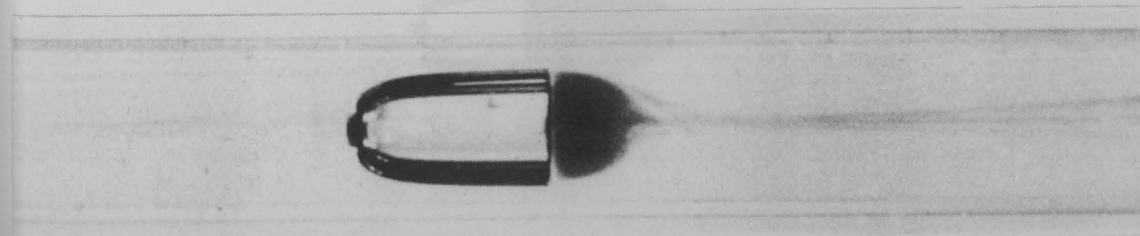
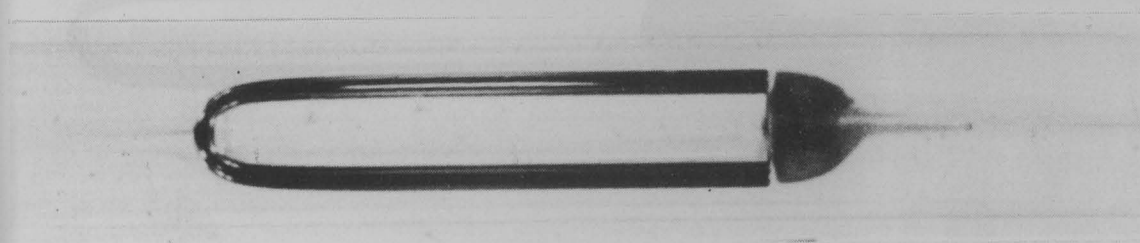


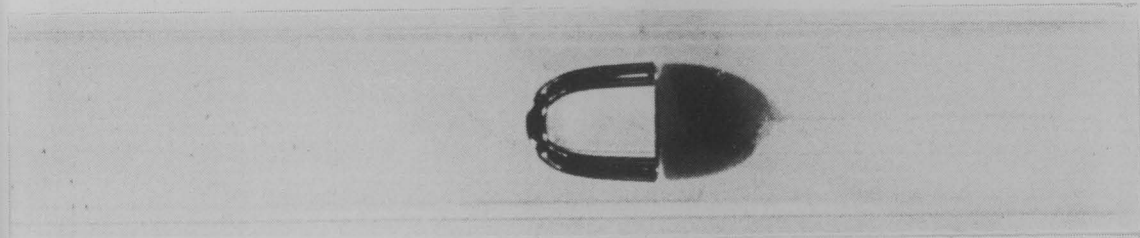
Figura 5.5 - Fotografias de esteiras laminares para diferentes Reynolds e tamanhos de "slugs"; $D = 19\text{mm}$ e escala 1:1.



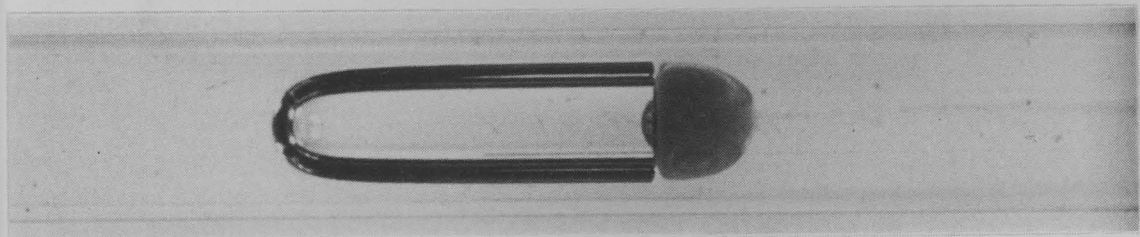
g) $Re = 114$
 $\Delta H = 15\text{mm}$
 $V_e = 1,30\text{cm}^3$



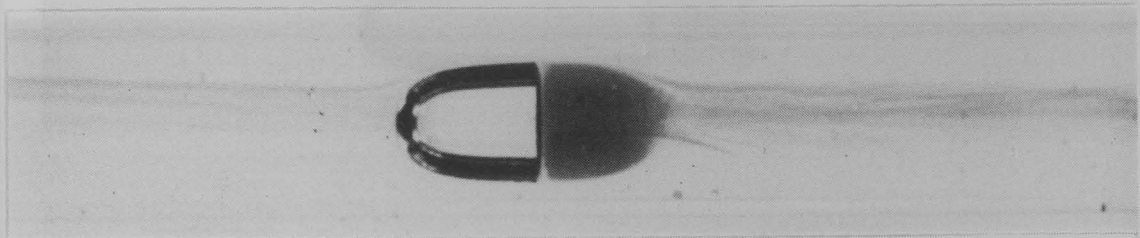
h) $Re = 114$
 $\Delta H = 49\text{mm}$
 $V_e = 1,61\text{cm}^3$



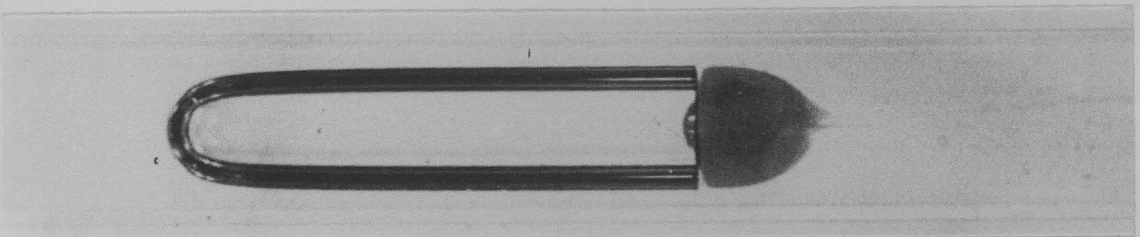
i) $Re = 153$
 $\Delta H = 9\text{mm}$
 $V_e = 1,90\text{cm}^3$



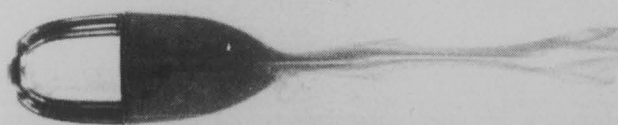
g) $Re = 153$
 $\Delta H = 32\text{mm}$
 $V_e = 2,17\text{cm}^3$



k) $Re = 170$
 $\Delta H = 8\text{mm}$
 $V_e = 2,18\text{cm}^3$



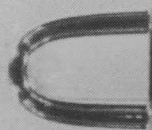
l) $Re = 170$
 $\Delta H = 43\text{mm}$
 $V_e = 2,38\text{cm}^3$



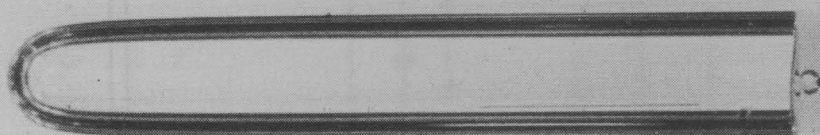
m) $Re = 179$
 $\Delta H = 8\text{mm}$
 $V_e = 2,53\text{cm}^3$



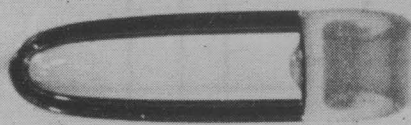
n) $Re = 179$
 $\Delta H = 53\text{mm}$
 $V_e = 2,67\text{cm}^3$



o) $Re = 264$
 $\Delta H = 9\text{mm}$
 $V_e = 2,64\text{cm}^3$



p) $Re = 264$
 $\Delta H = 68\text{mm}$
 $V_e = 3,90\text{cm}^3$



q) $Re = 170$

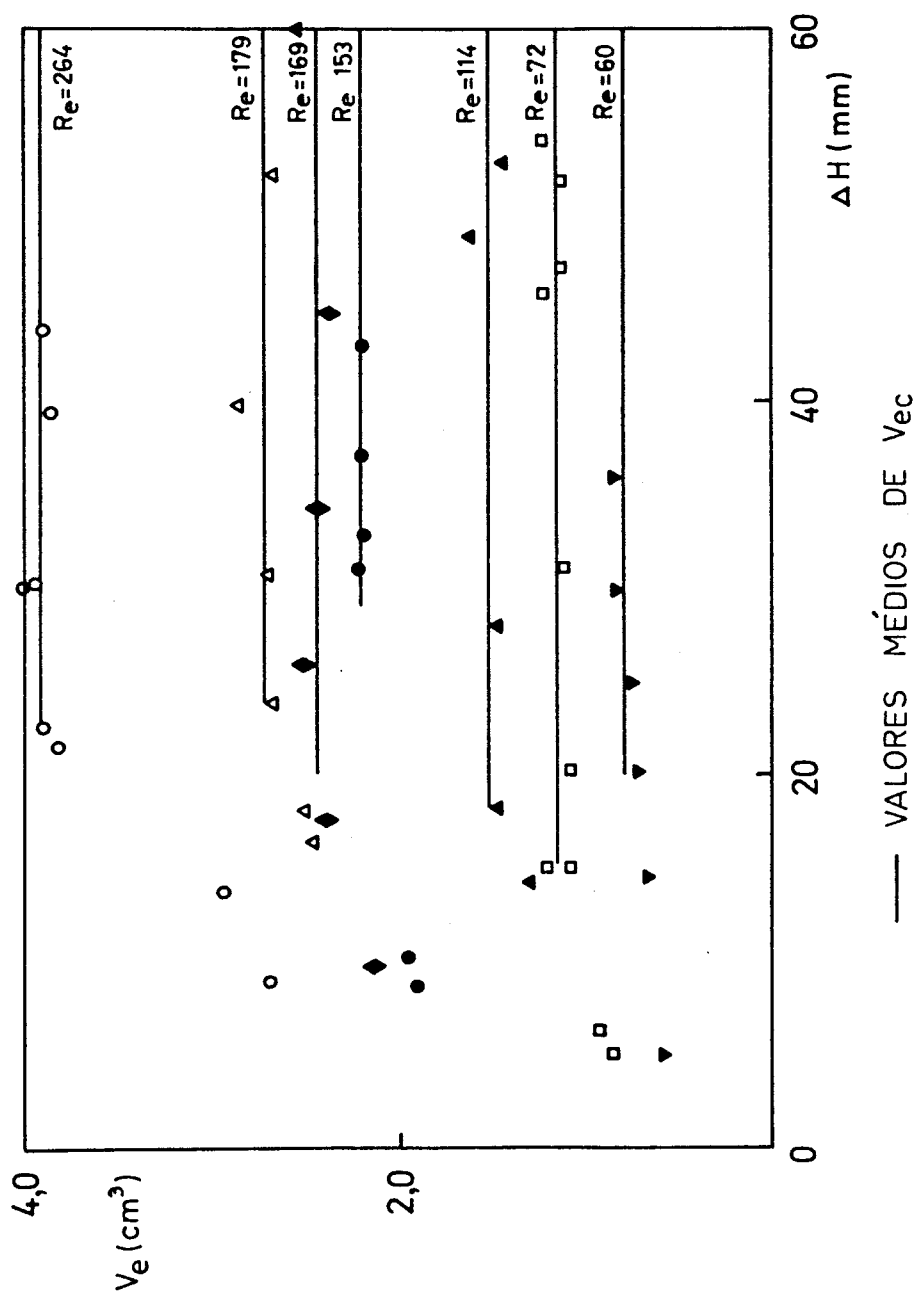


Figura 5.6 - Volume da esteira, V_e , em função do tamanho do "slug", ΔH , para diferentes valores de Reynolds; valores obtidos através de fotografias instantâneas de "slugs" a ascenderam numa coluna de 19 mm.

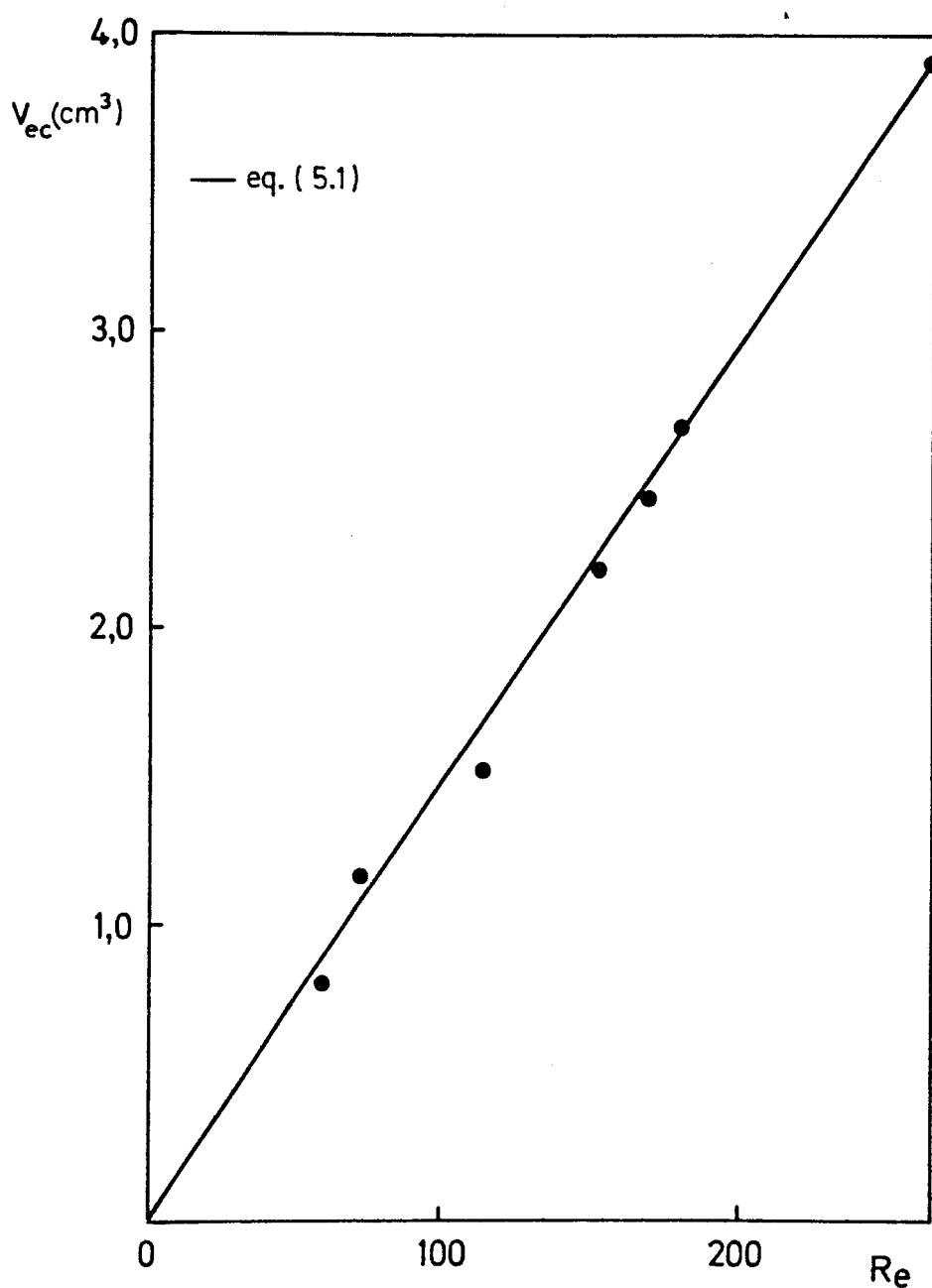


Figura 5.7 - Volume da esteira de "slugs" com película lateral de líquido estabilizada ($\Delta H > \Delta H_c$) em função do número de Reynolds.

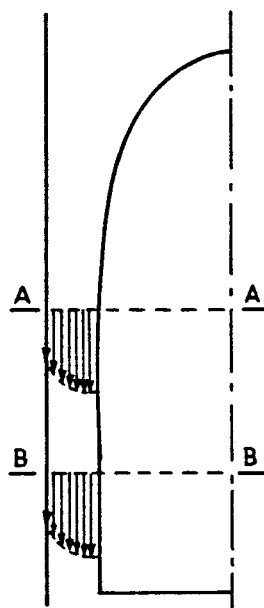


Figura 5.8 - Perfis de velocidade na zona da película lateral de espessura constante (δ_c).

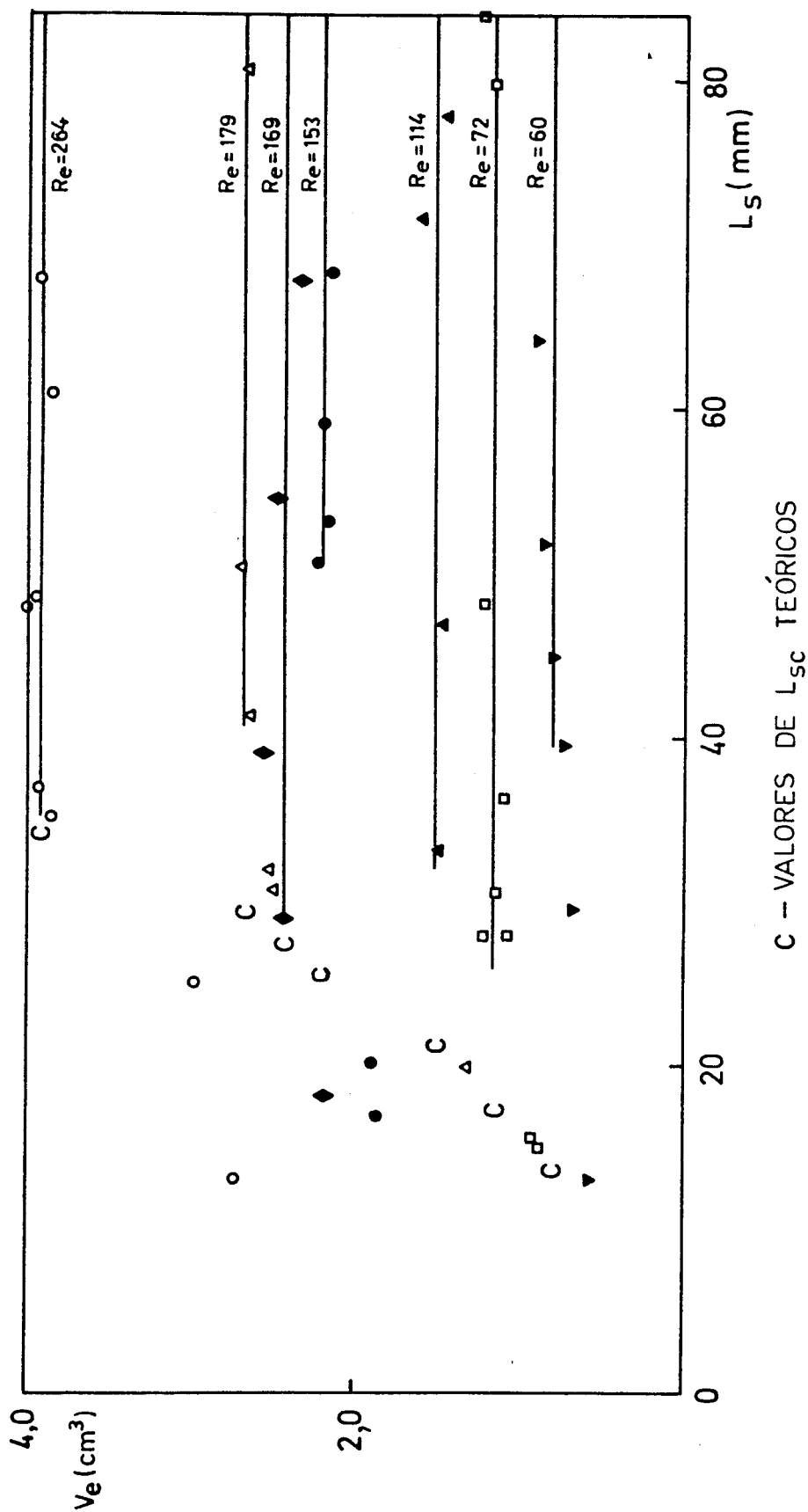


Figura 5.9 - Volume da esteira, V_e , em função do comprimento do "slug", L_s ; valores obtidos através de fotografias instantâneas de "slugs" a ascenderem numa coluna de 19 mm.

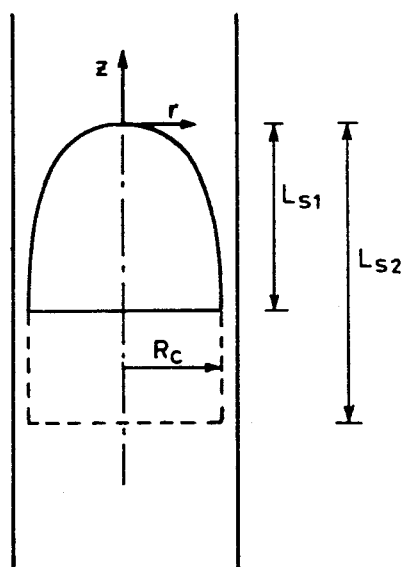


Figura 5.10 - Representação esquemática da variação de V_s com L_s em "slugs" suficientemente compridos ($L_s > L_{sc}$).

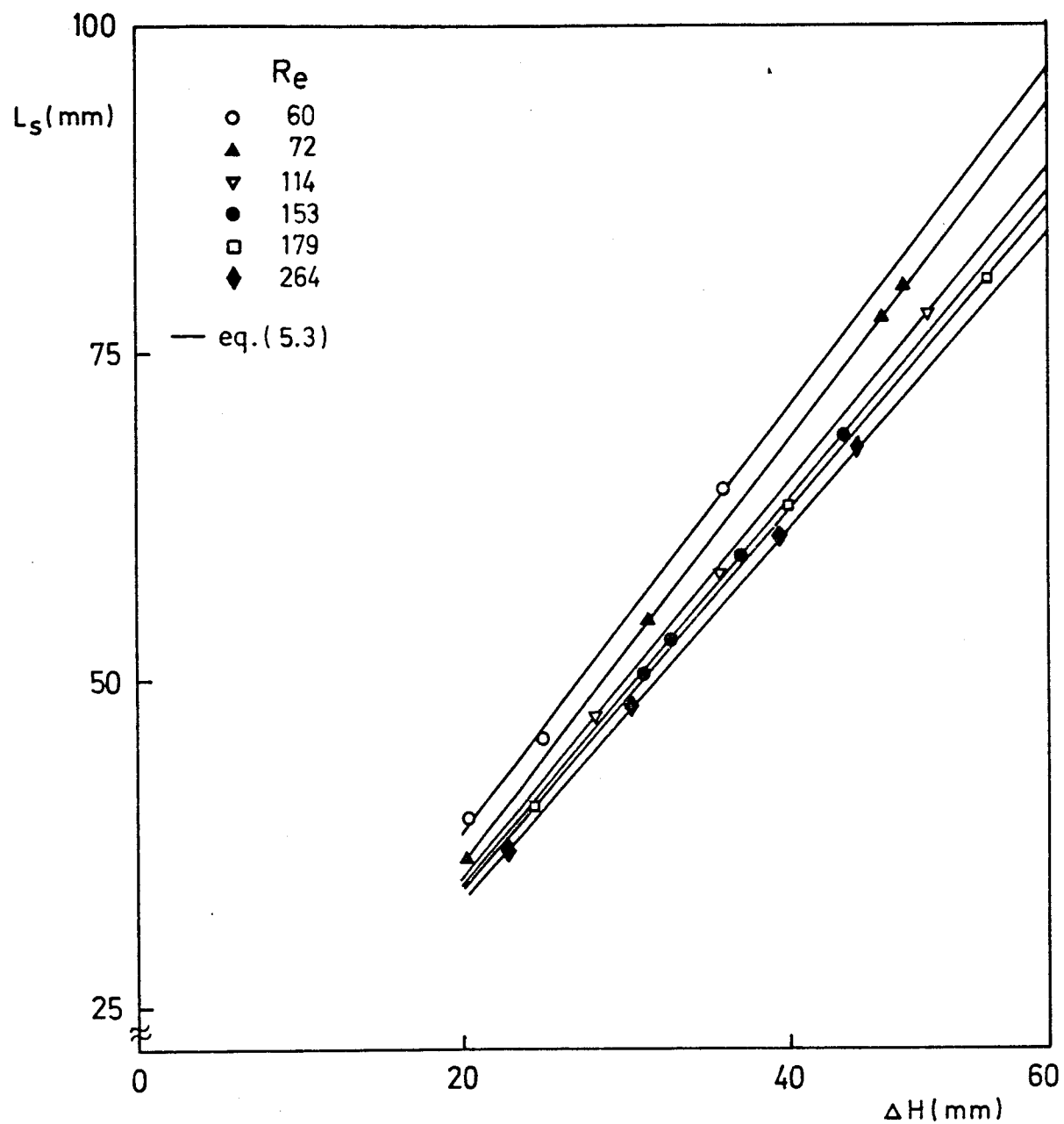


Figura 5.11 - Variação do comprimento de um "slug" estabilizado ($L_s > L_{sc}$) com a altura de líquido por si deslocado, ΔH , para diferentes valores de Re .

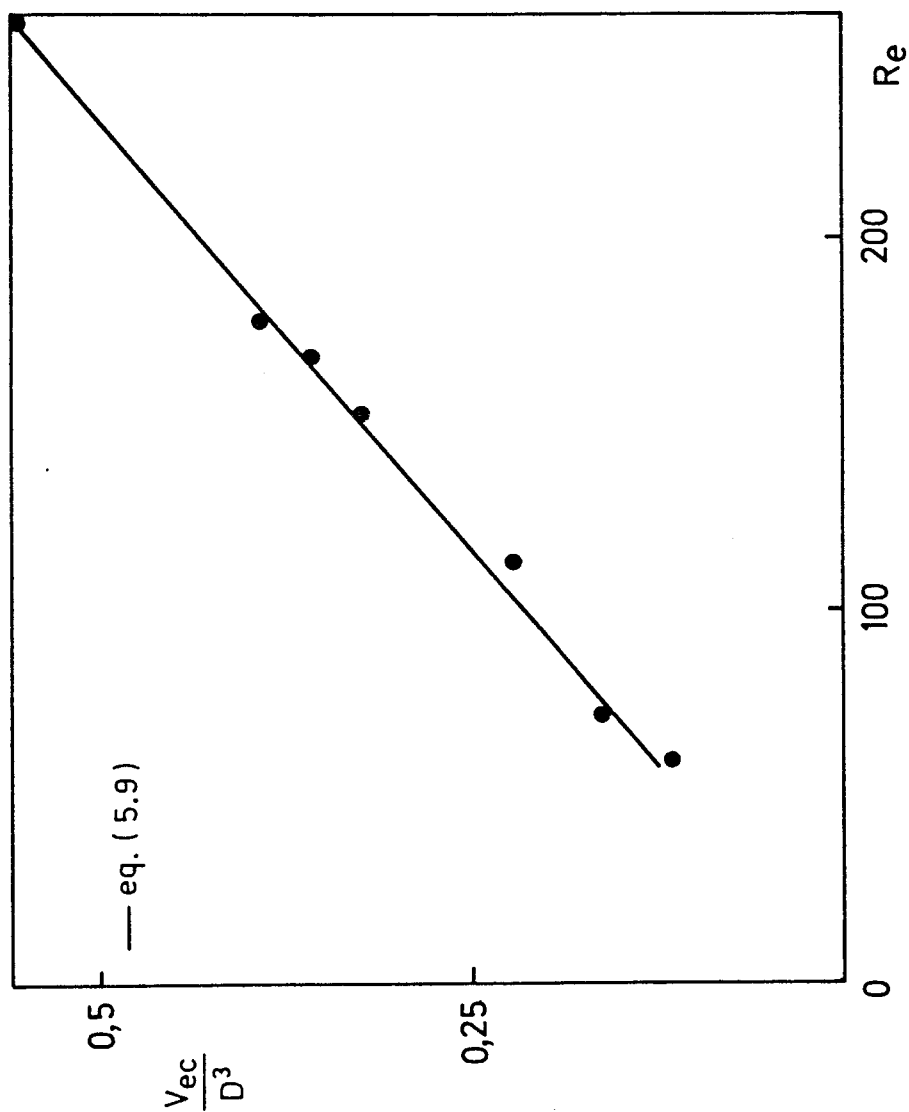


Figura 5.12 - Grupo adimensional V_{ec}/D^3 vs. Re para esteiras laminares de "slugs" a ascenderem numa coluna.

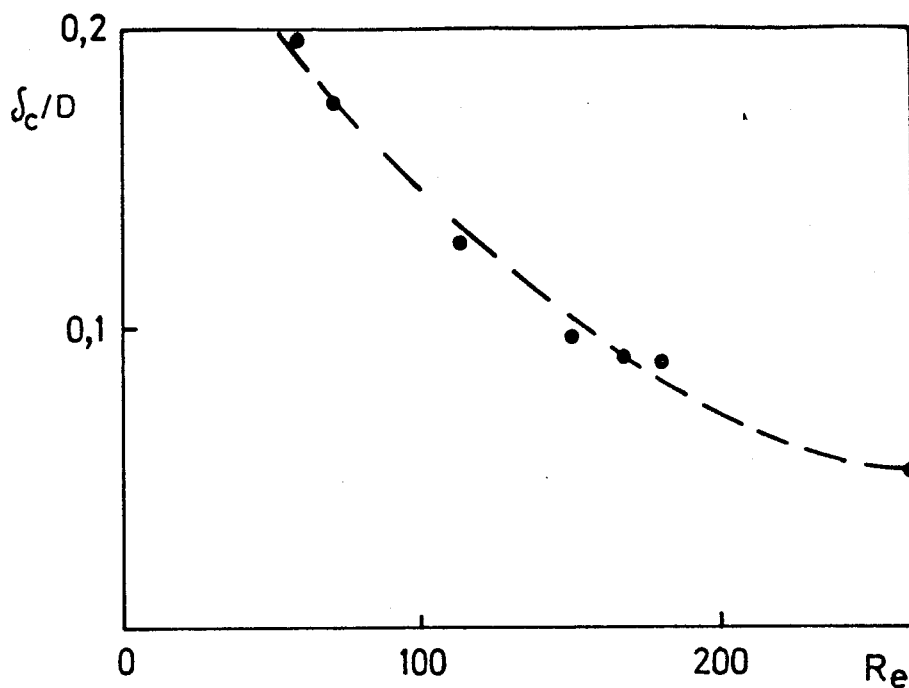


Figura 5.13 - Grupo adimensional δ_c/D vs. Re para esteiras laminares de "slugs" a ascenderem numa coluna.

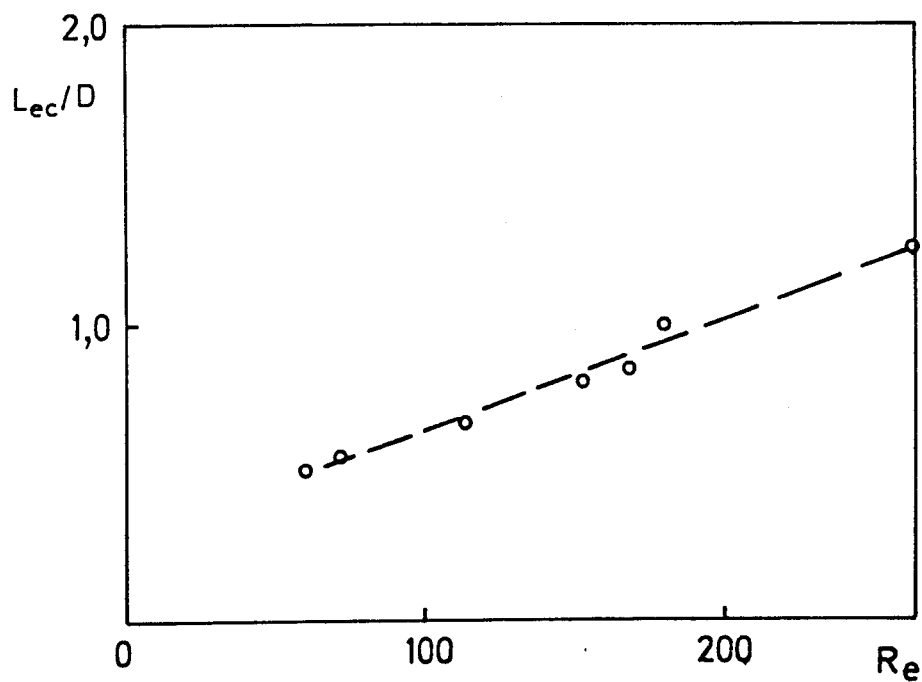
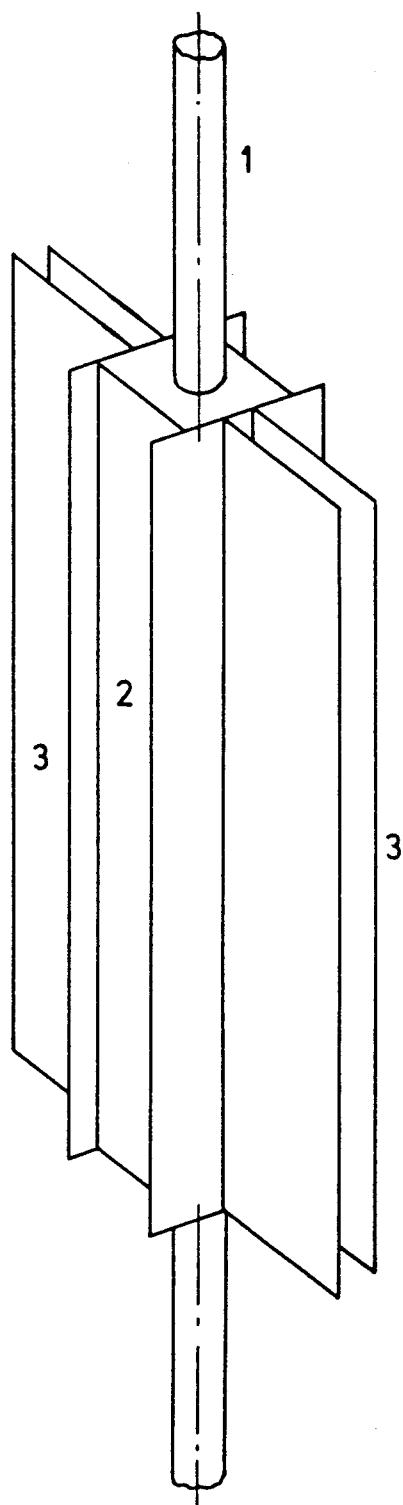


Figura 5.14 - Grupo adimensional L_{ec}/D vs. Re para esteiras laminares de "slugs" a ascenderem numa coluna.



- 1 - COLUNA
- 2 - CAIXA TRANSPARENTE
- 3 - ANTEPAROS NEGROS
- 4 - PROJECTOR

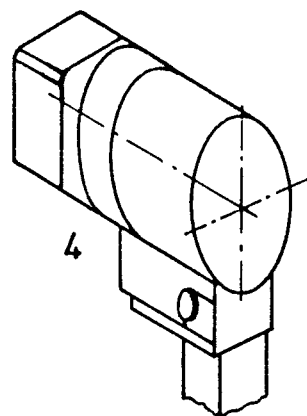


Figura 5.15 - Sistema de iluminação usado para estudar fotograficamente as trajetórias do líquido na esteira do "slug".

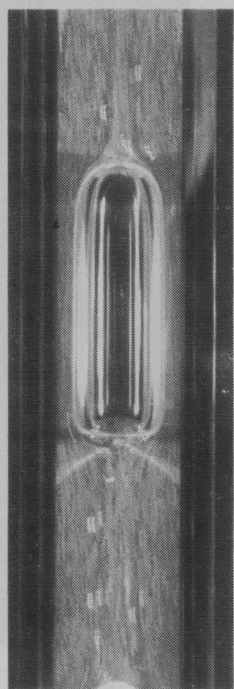
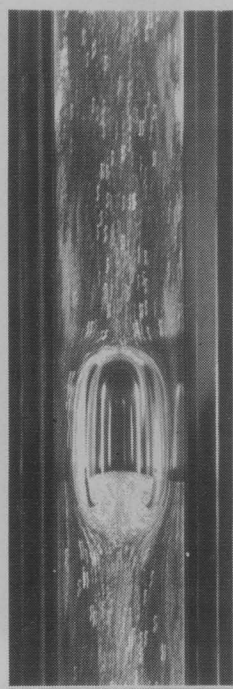
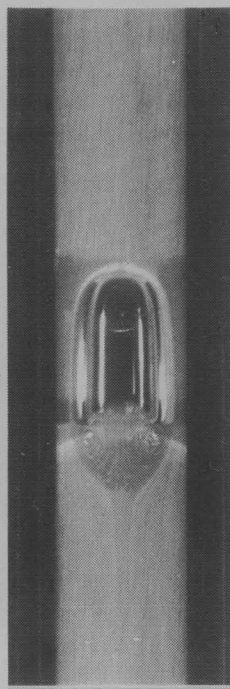
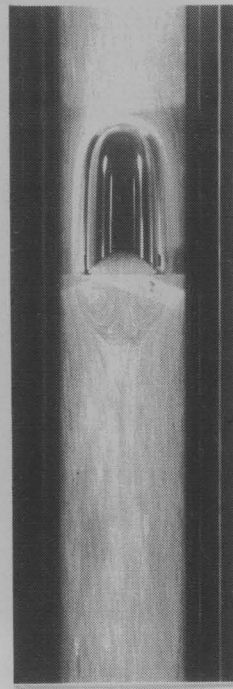
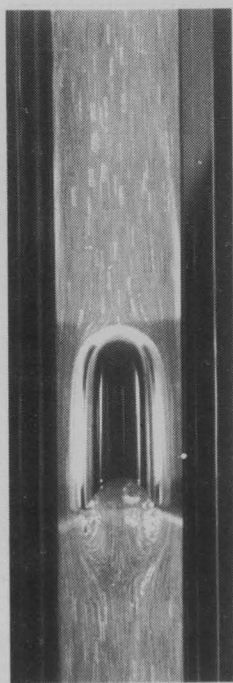
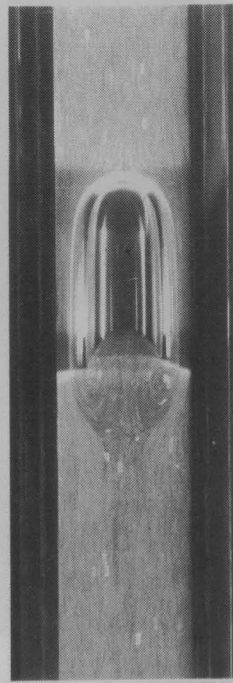
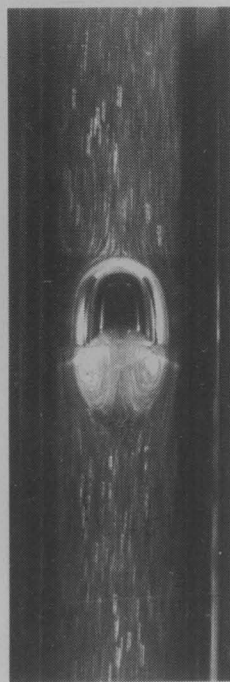
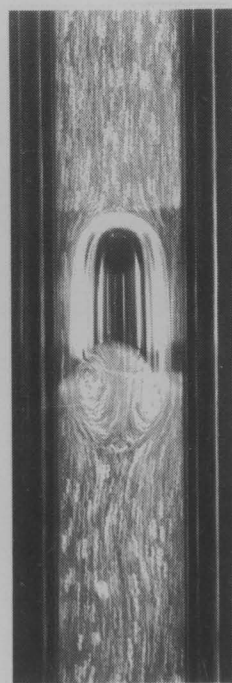
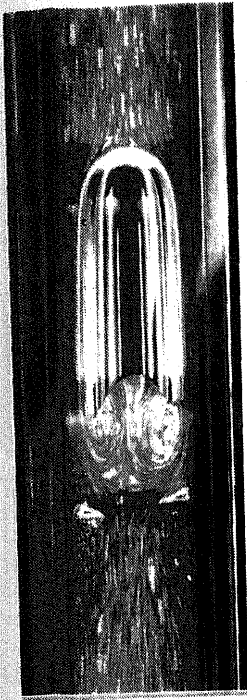
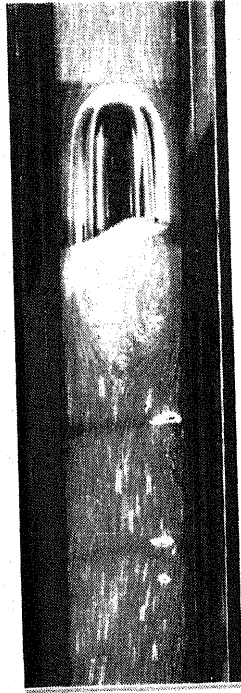
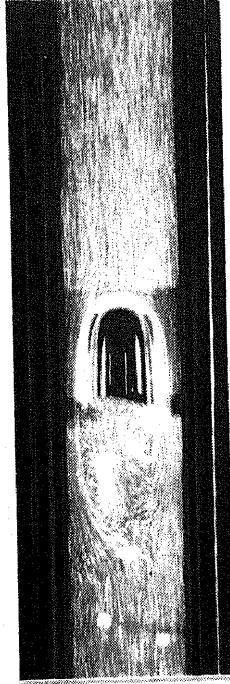
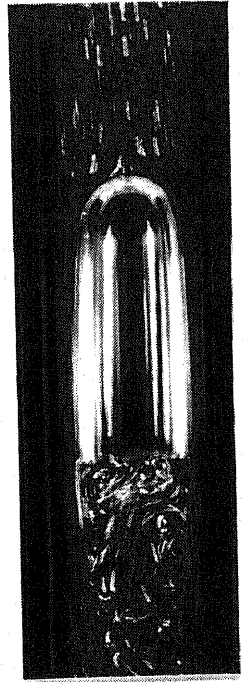
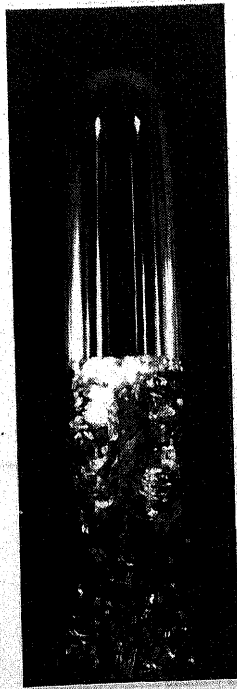
a) $Re = 29$ b) $Re = 56$ c) $Re = 86$ d) $Re = 92$ e) $Re = 127$ f) $Re = 147$ g) $Re = 162$ h) $Re = 180$

Figura 5.16 - Fotografias das trajetórias do líquido na esteira para diferentes valores de Reynolds; $D = 52\text{mm}$ e escala 1:3.

i) $Re = 182$ g) $Re = 210$ k) $Re = 304$ l) $Re = 500$ m) $Re = 3880$ n) $Re = 13300$

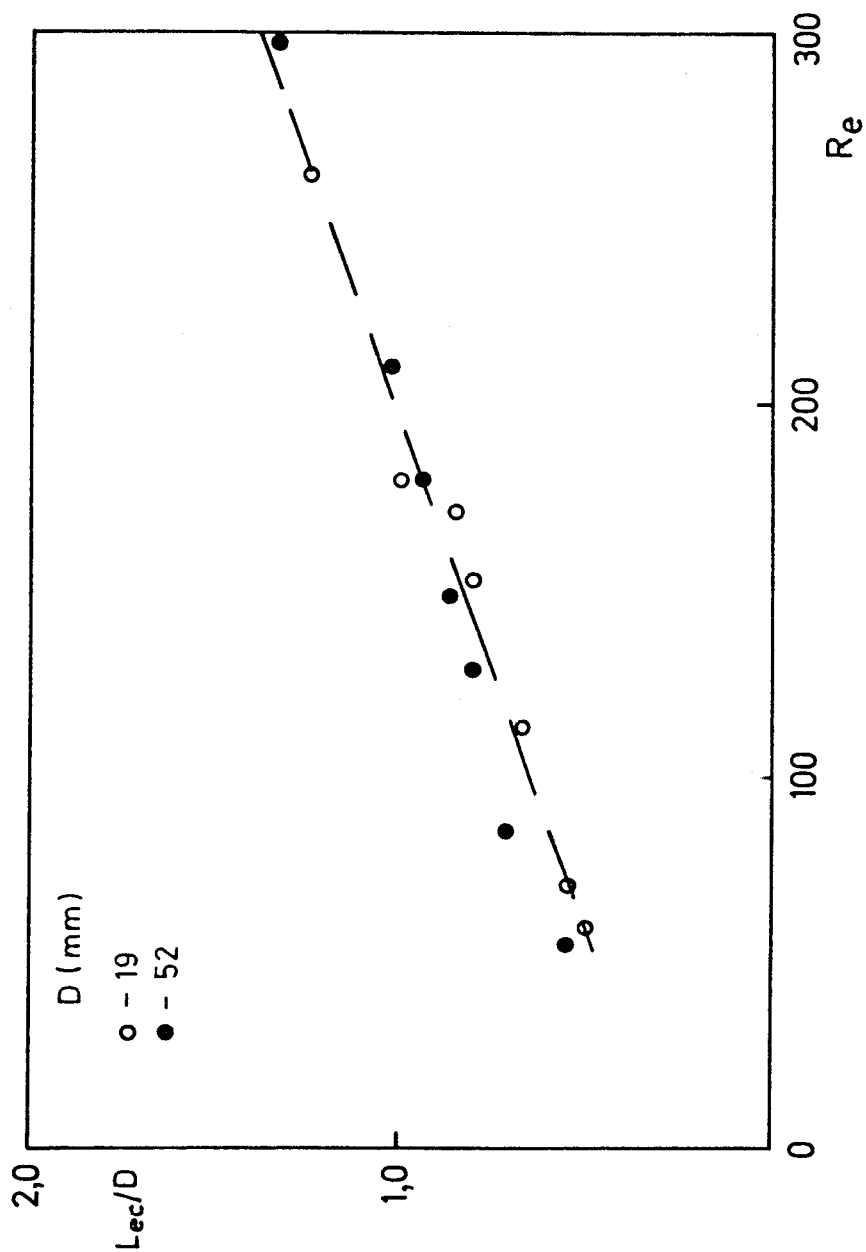


Figura 5.17 - Comparação entre os valores de L_{ec}/D obtidos nos estudos fotográficos levados a cabo em colunas de 19 e 52 mm.

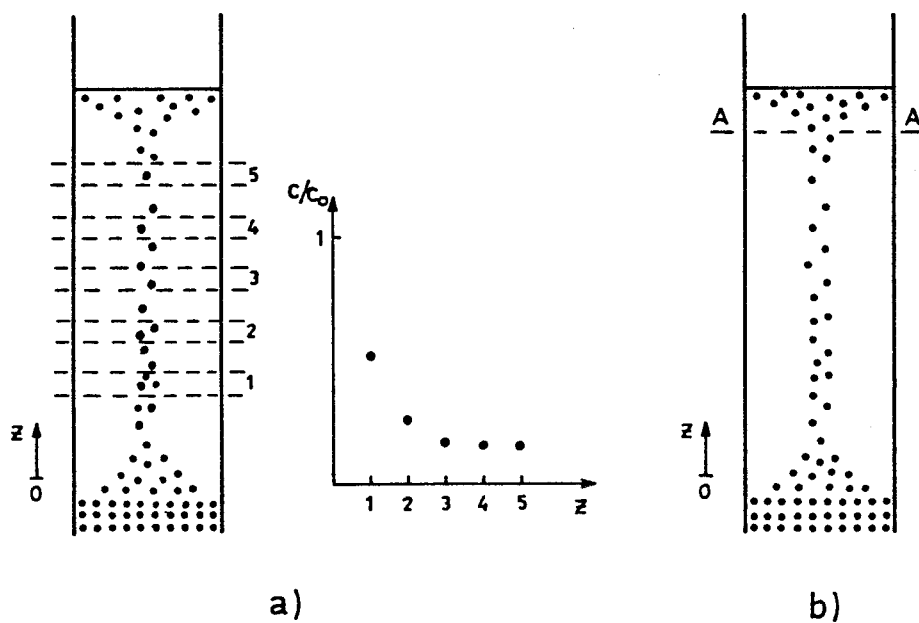


Figura 5.18 - Esquema da amostragem de líquido na coluna: a) experiências tipo 1; b) experiências tipo 2.

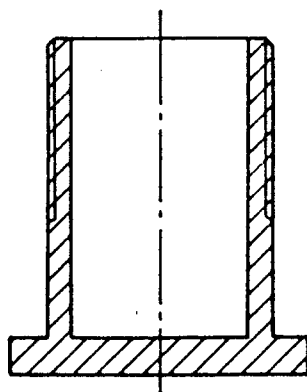


Figura 5.19 - Representação (em corte) da peça utilizada para injeção do "slug".

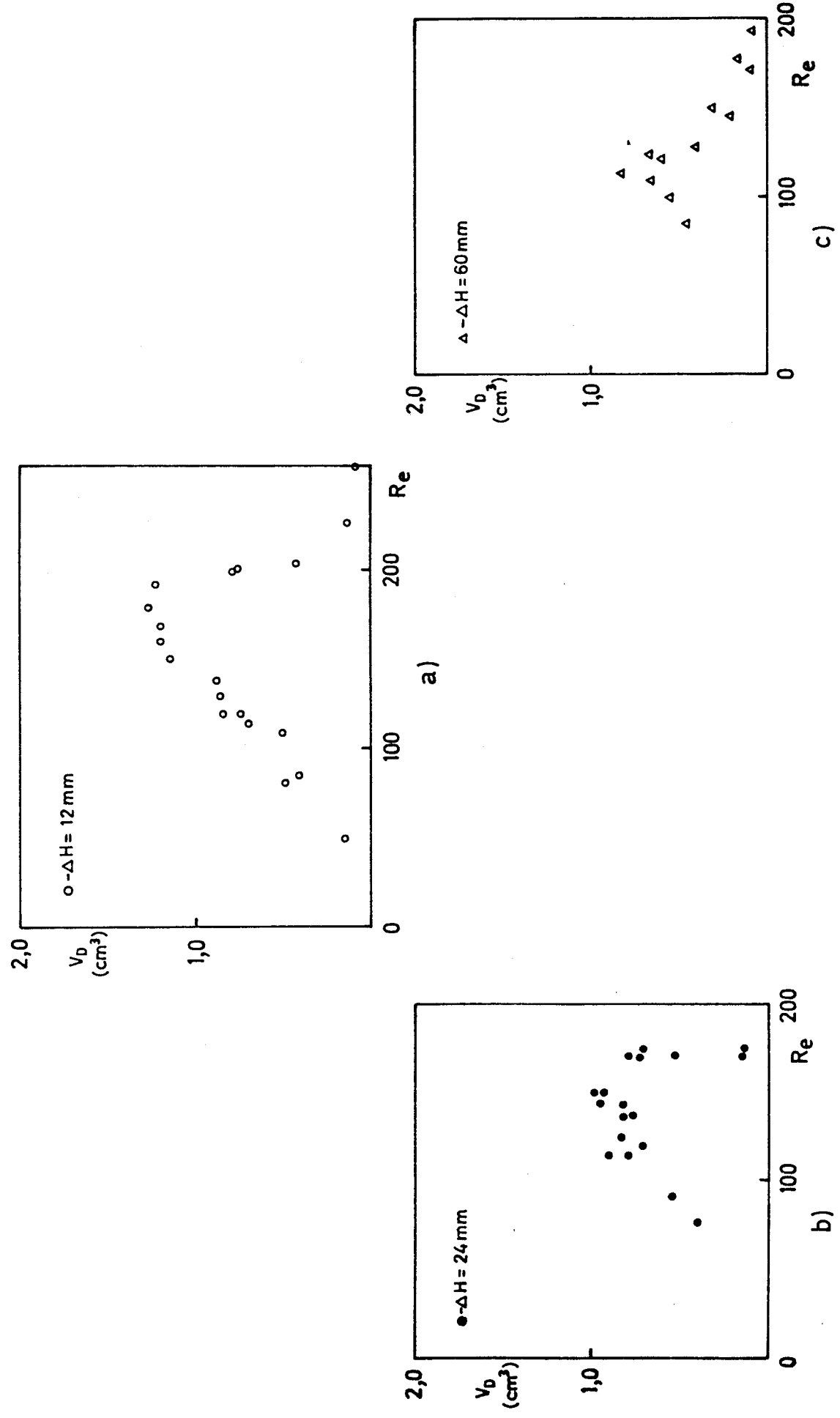


Figura 5.20 - Volume de líquido concentrado, $c = c_0$, que tem massa de corante igual à que é deposita pela esteira no topo da coluna, V_D , em função de Reynolds para $\Delta H = 12$ (a), 24 (b) e 60 mm (c).

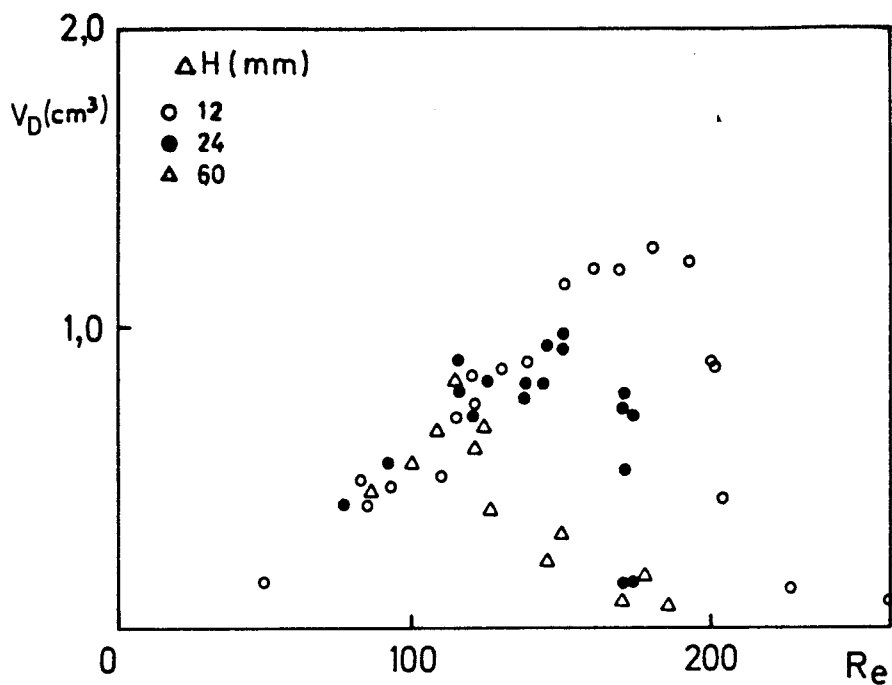


Figura 5.21 - Comparação entre os valores de V_D obtidos com "slugs" de diferentes tamanhos.

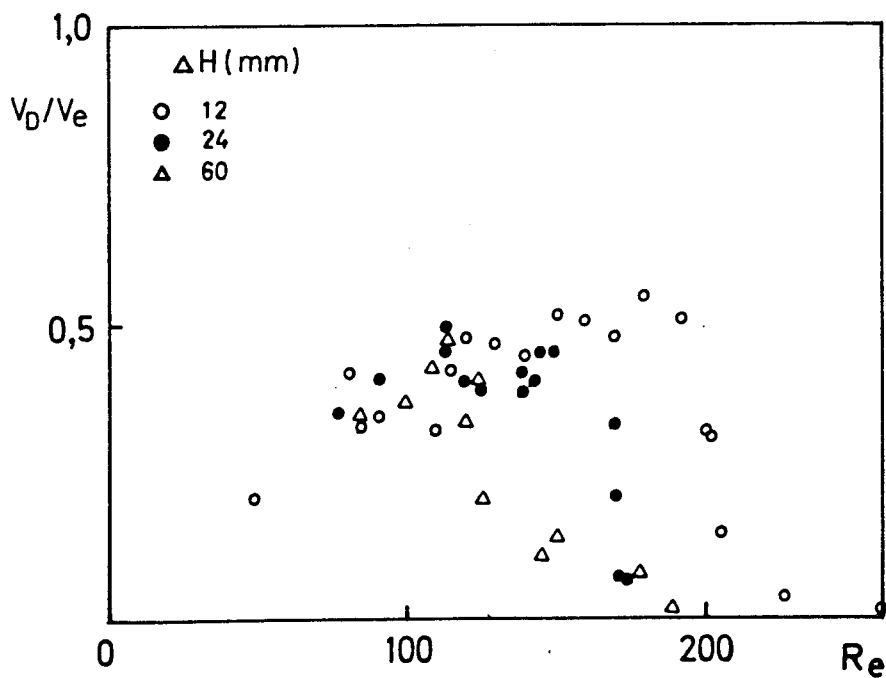


Figura 5.22 - V_D/V_e vs. Re para "slugs" com $\Delta H = 12, 24$ e 60 mm.

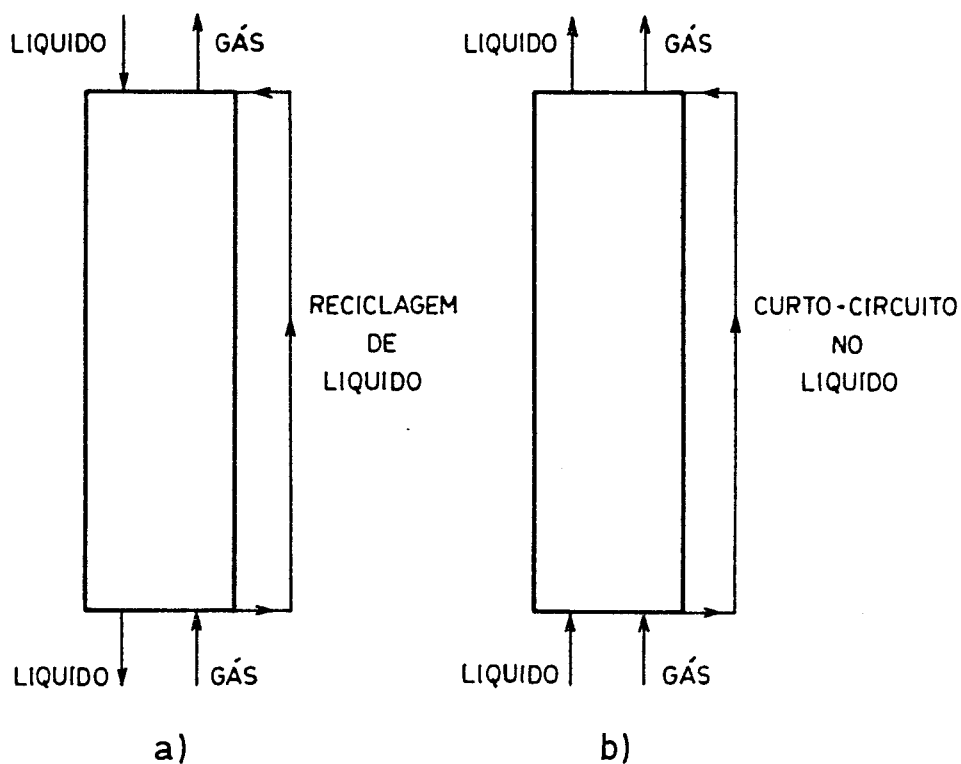


Figura 5.23 - Colunas de borbulhamento gás-líquido: a) coluna a operar em contra-corrente com reciclagem provocada pela esteira; b) coluna a operar em co-corrente com a fase líquida curto-circuitada pela esteira.

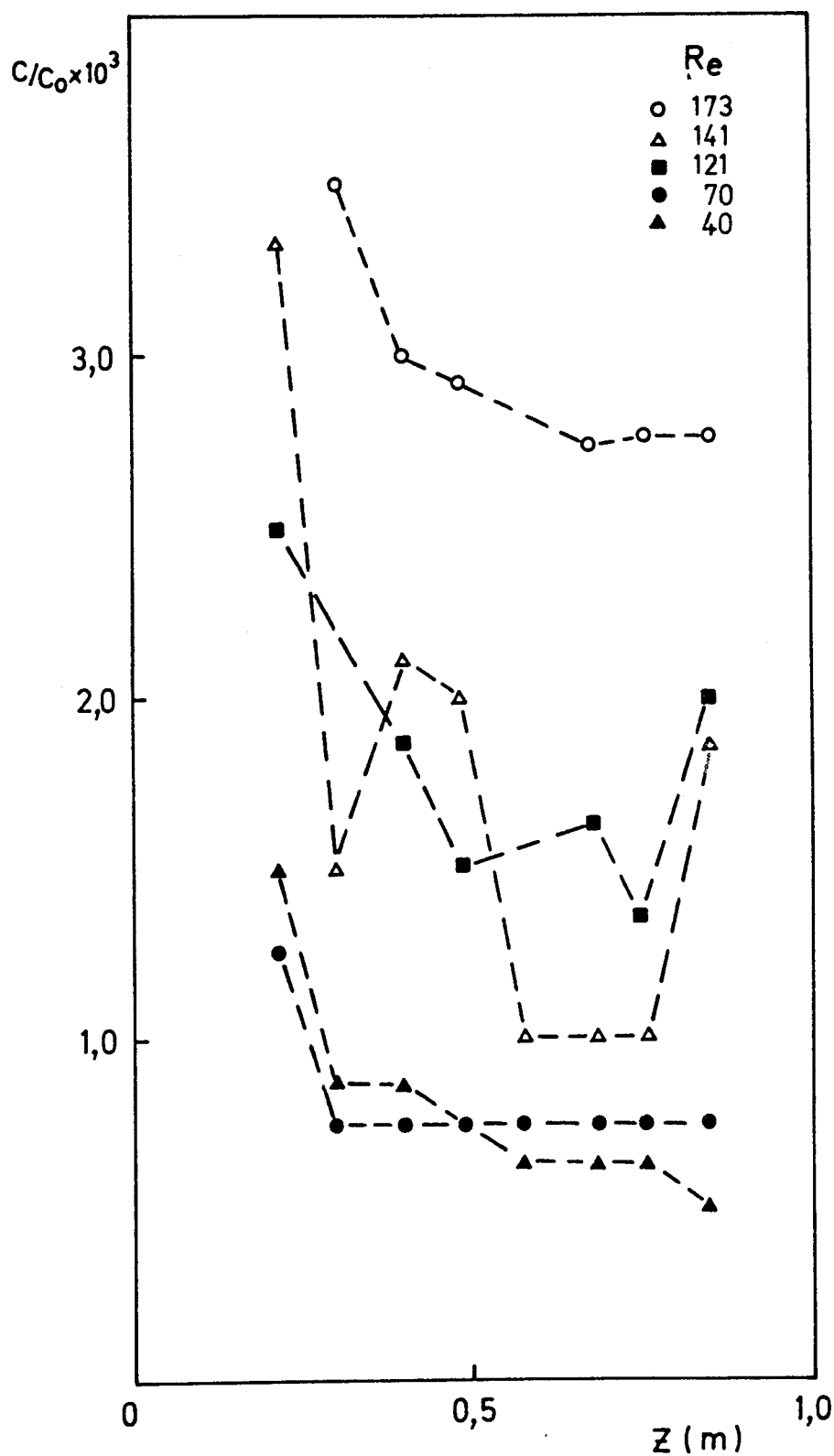


Figura 5.24 - Concentração no rasto que uma esteira em regime laminar deixa no líquido incolor; $D = 19$ mm, $\Delta H = 12$ mm.

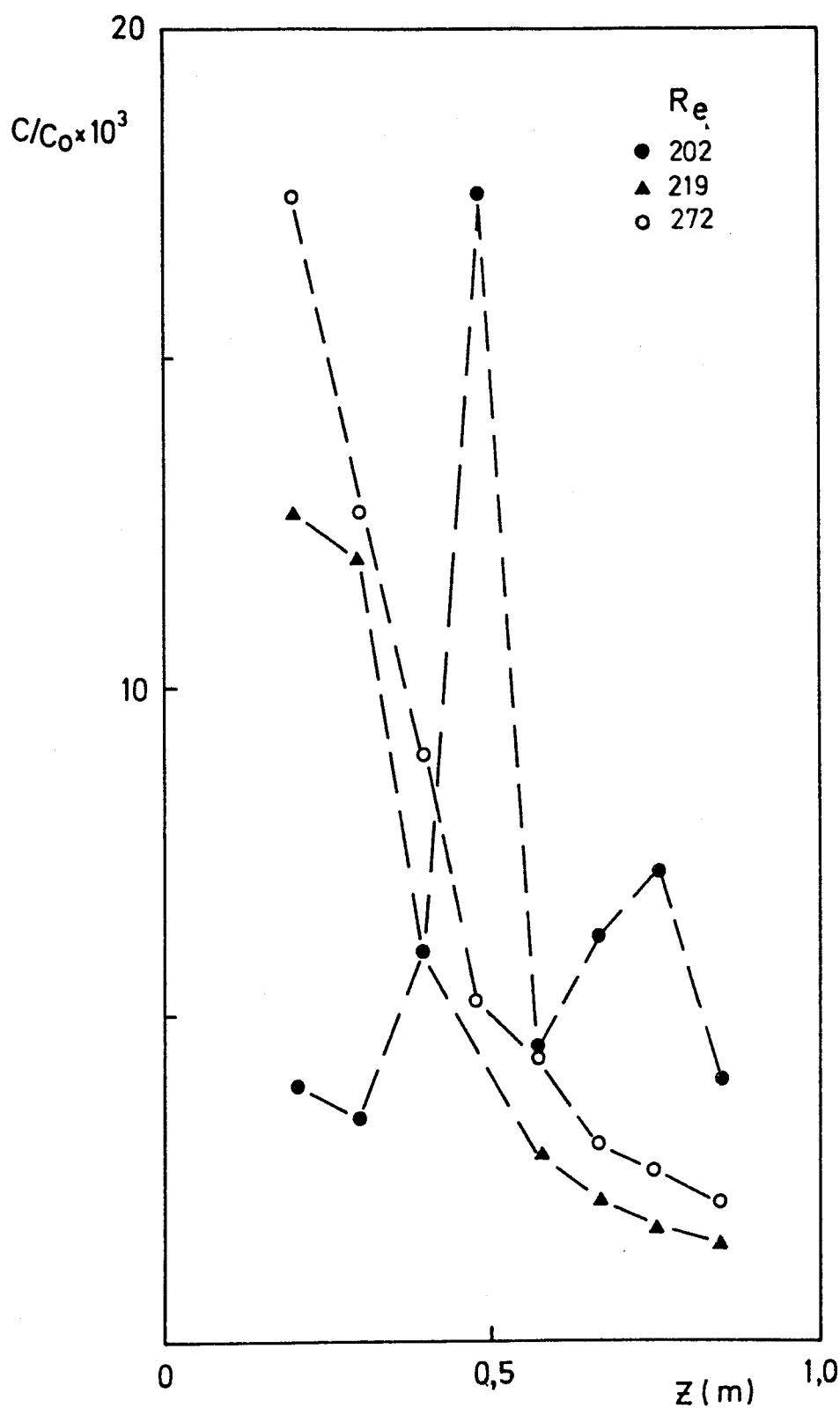


Figura 5.25 - Concentração no rasto que uma esteira em regime de transição ($Re > 202$) deixa no líquido incolor; $D = 19$ mm; $\Delta H = 12$ mm.

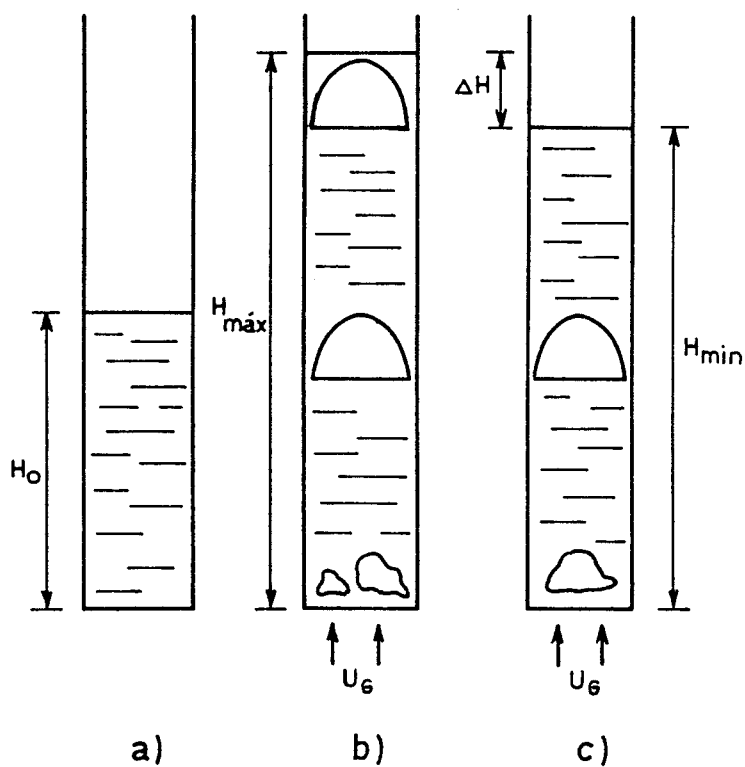


Figura 6.1 - Representação esquemática de uma coluna de borbulhamento gás-líquido a operar em regime de "slugging":
 a) coluna de líquido; b) coluna no instante imediatamente anterior ao de um "slug" rebentar à superfície;
 c) coluna após o "slug" rebentar à superfície.

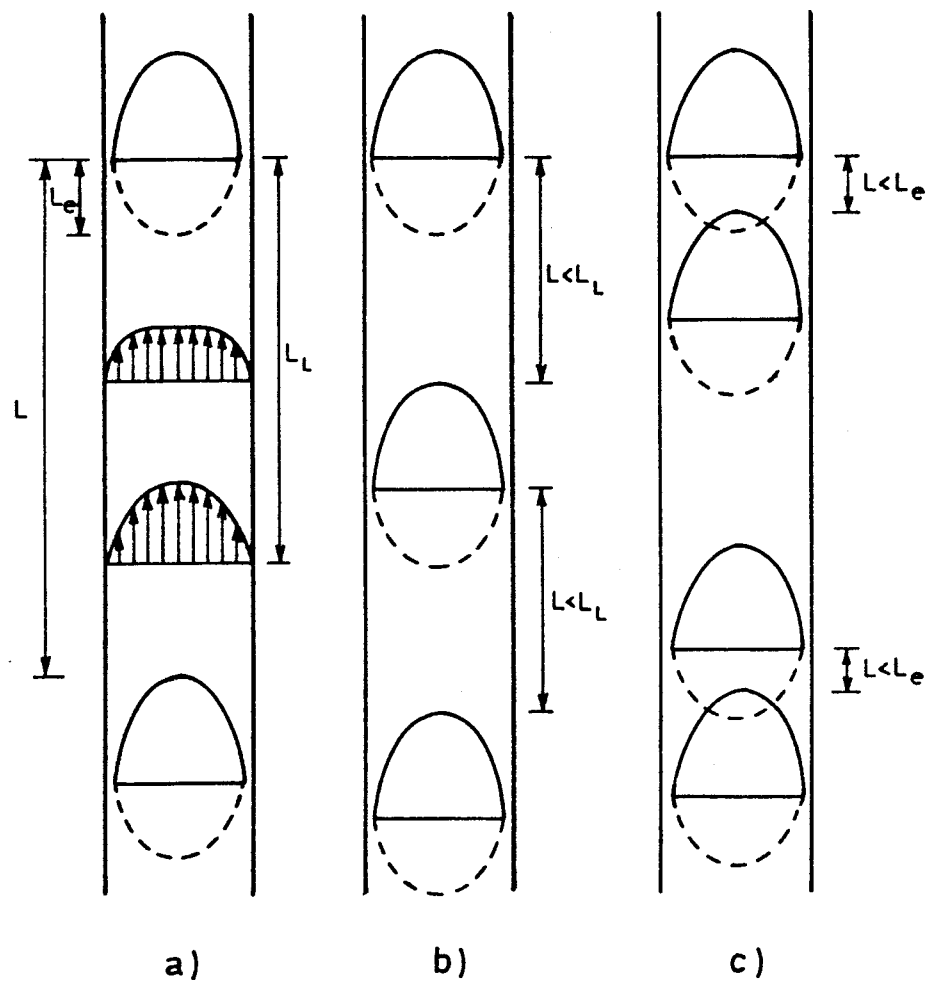


Figura 6.2 - Ilustração das possíveis distâncias (L) entre dois "slugs" consecutivos.

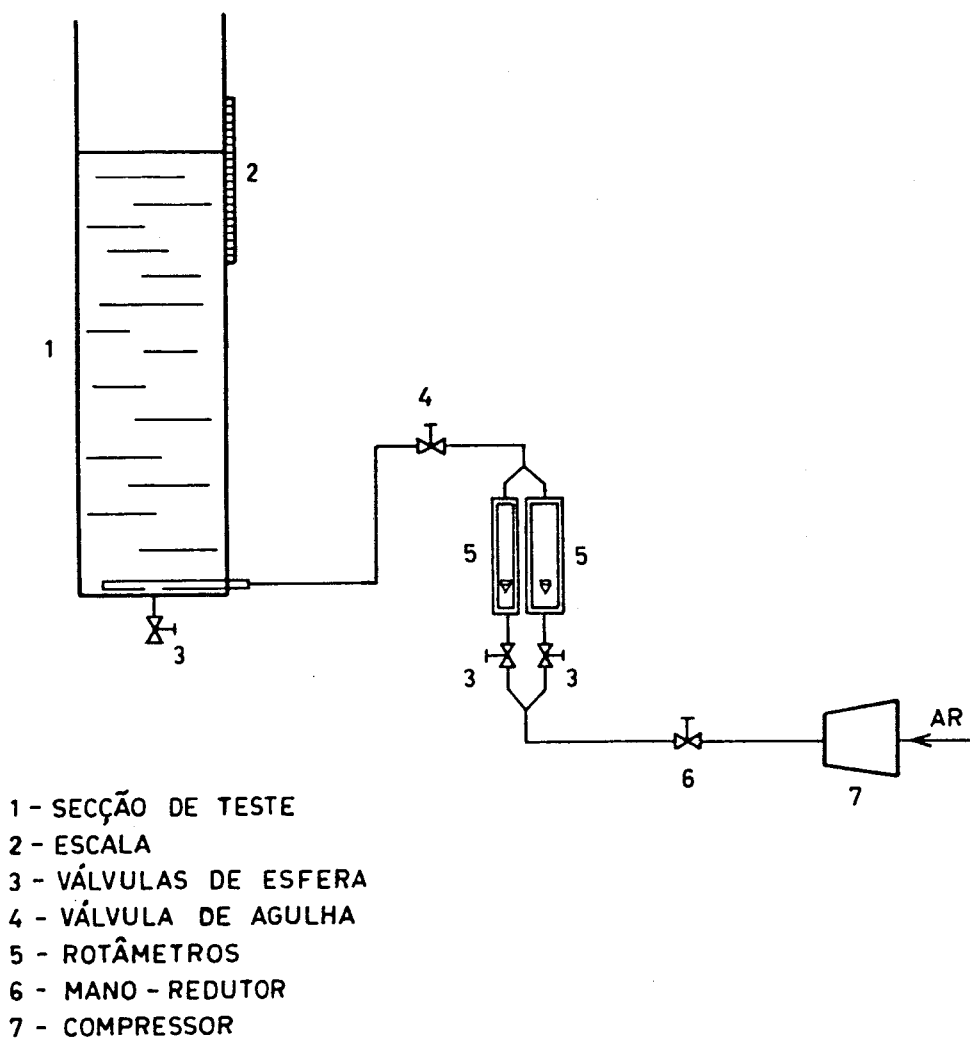
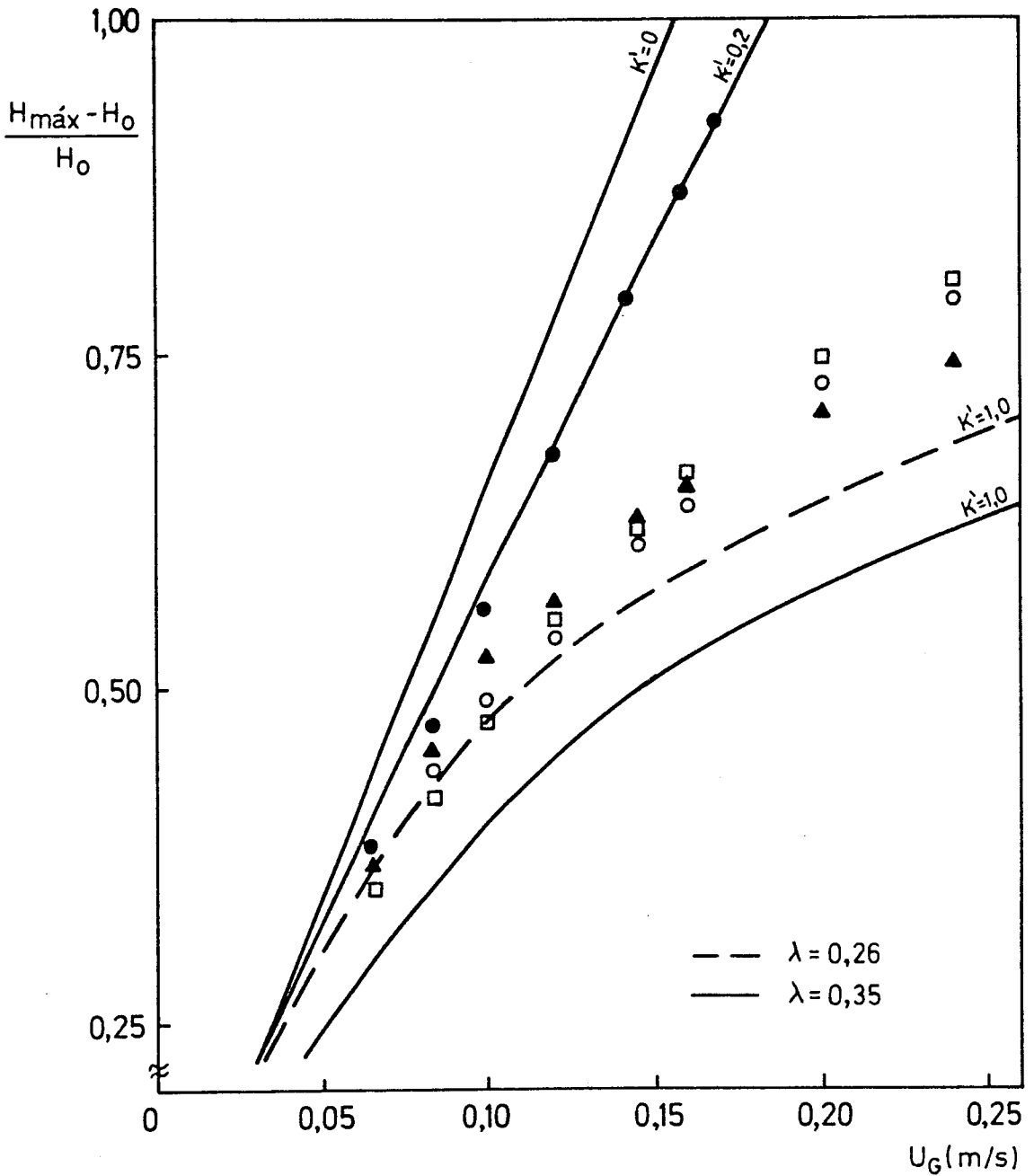
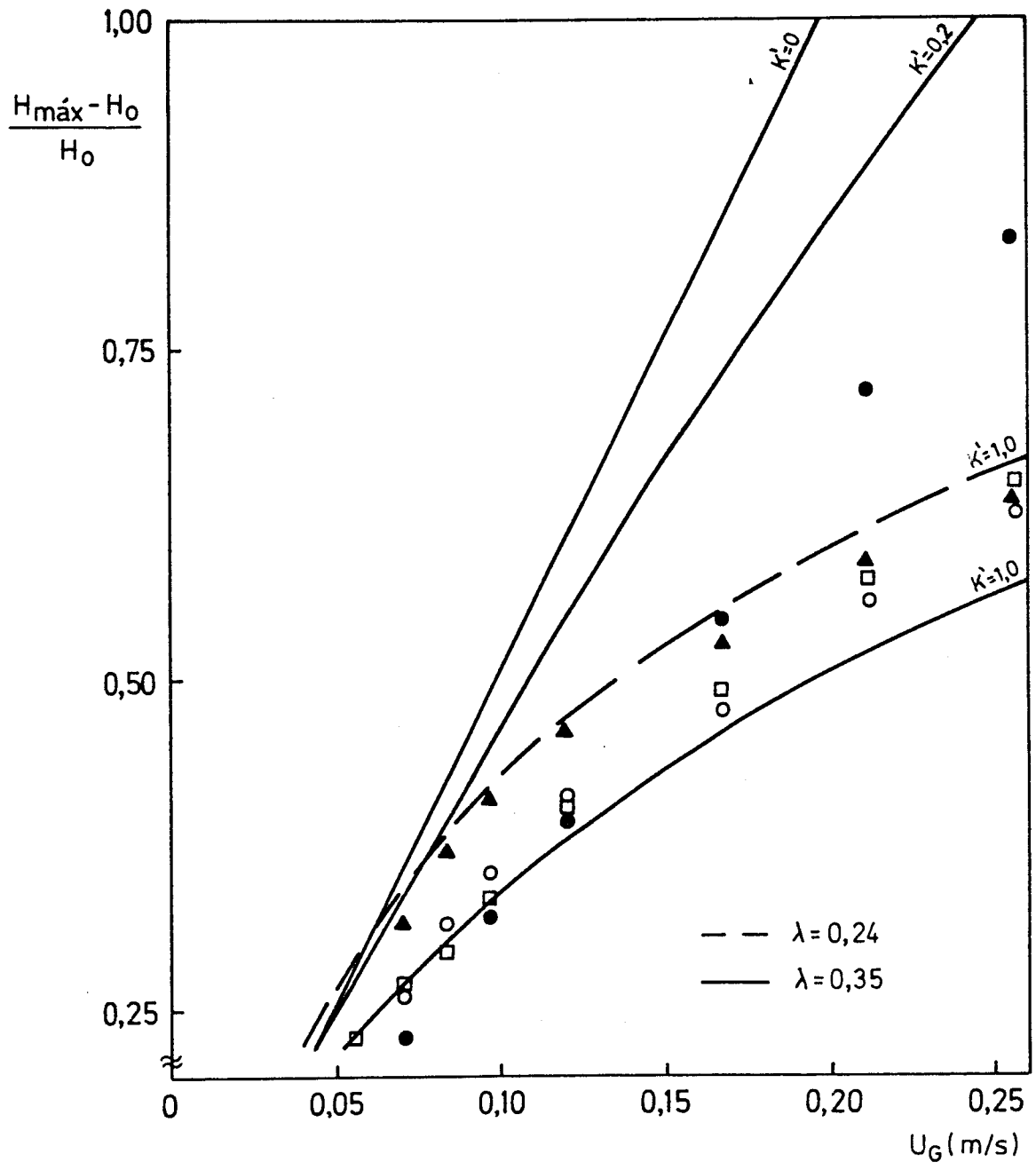


Figura 6.3 - Representação esquemática da secção de teste utilizada no estudo experimental.



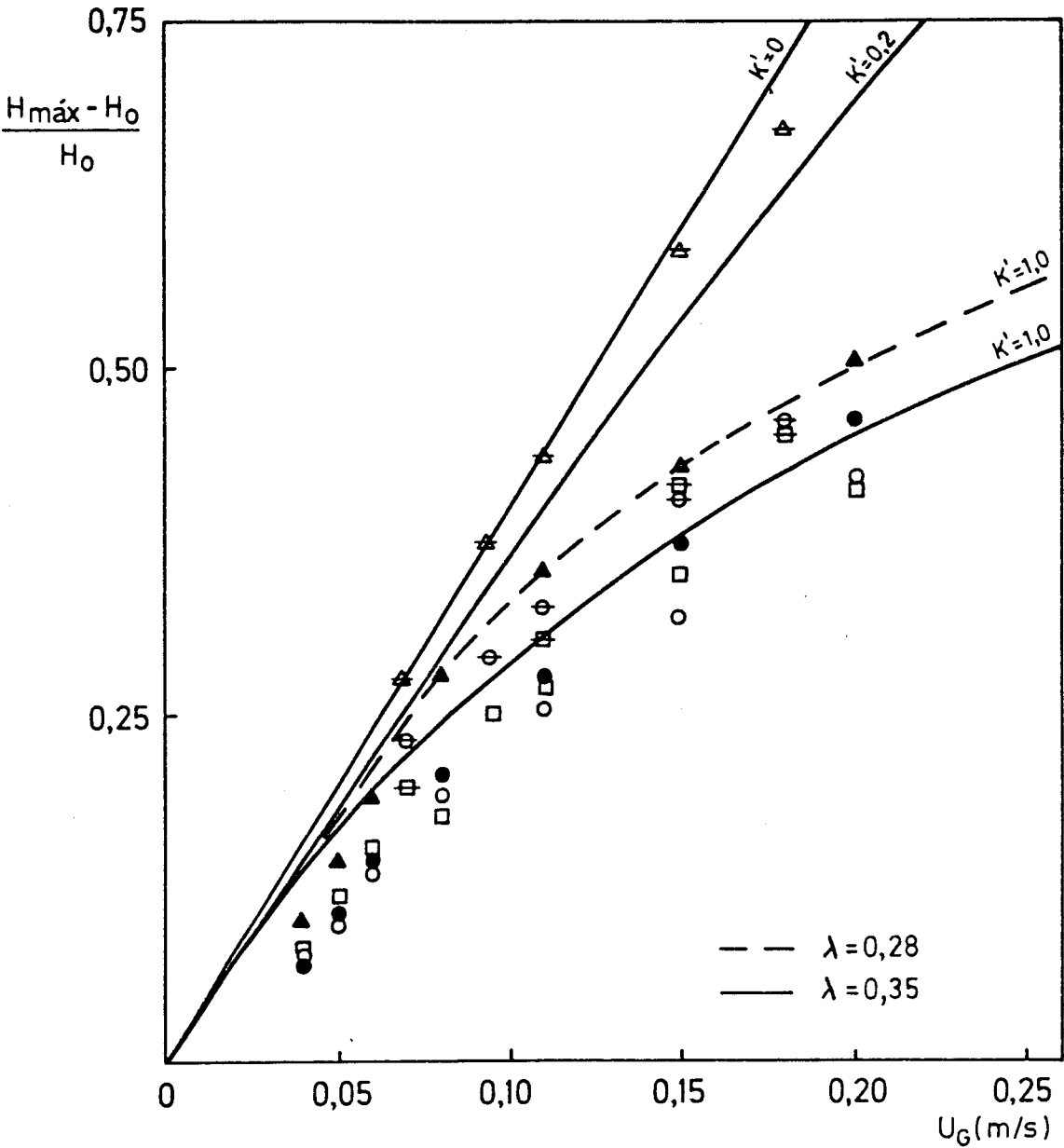
	$\nu \times 10^6 \text{ (m}^2/\text{s)}$	$Re (= U_S D / \nu)$	λ
▲	149,0	14,3	0,26
○	57,5	75,0	0,35
□	38,1	126,0	0,35
●	1,0	$2,9 \times 10^3$	0,35

Figura 6.4a - Comparação entre a expansão prevista e a observada experimentalmente numa coluna de borbulhamento gás-líquido de diâmetro 19 mm; $H_0 = 1,10$ m.



	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)	Re (= $U_G D / \nu$)	λ
▲	585,0	7,4	0,24
○	57,2	109,0	0,35
□	29,2	215,0	0,35
●	1,0	$6,3 \times 10^3$	0,35

Figura 6.4b - Comparação entre a expansão prevista e a observada experimentalmente numa coluna de borbulhamento gás-líquido de diâmetro 32 mm; $H_0 = 1,10$ mm.



	$\nu \times 10^6 \text{ (m}^2/\text{s)}$	$Re (= U_s D / \nu)$	λ	ϵ
▲	546,0	19,0	0,28	—
○	89,2	144,0	0,35	—
□	60,0	216,0	0,35	—
●	1,0	$1,3 \times 10^4$	0,35	—
△	—	—	—	0,27
⊕	—	—	—	0,39
⊖	—	—	—	0,51

Figura 6.4c - Comparação entre a expansão prevista e a observada experimentalmente, quer numa coluna de borbulhamento gás-líquido de diâmetro 52 mm, quer numa coluna com uma suspensão de partículas neutras igualmente com 52 mm de diâmetro; $H_0 = 1,10$ m.

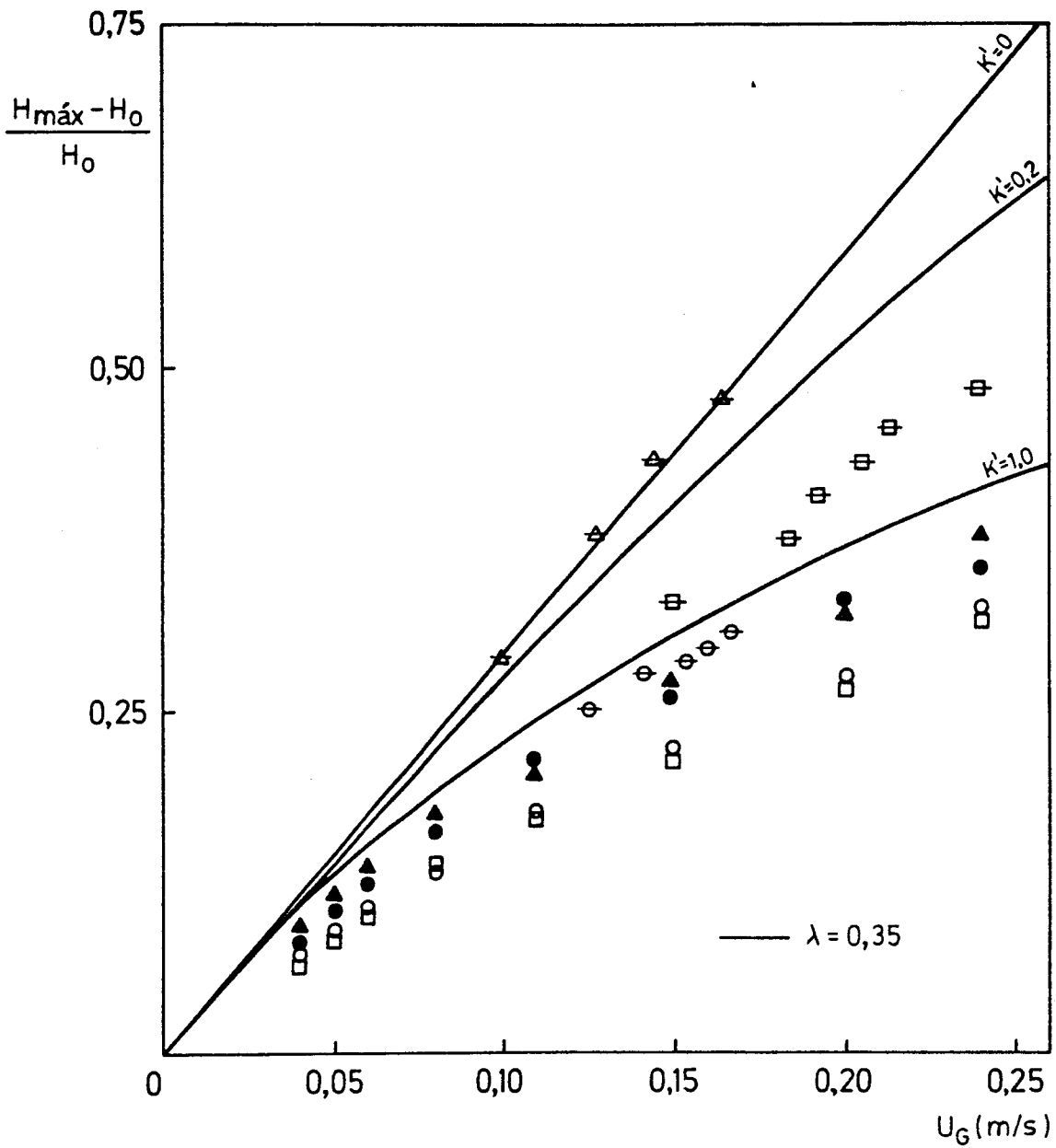
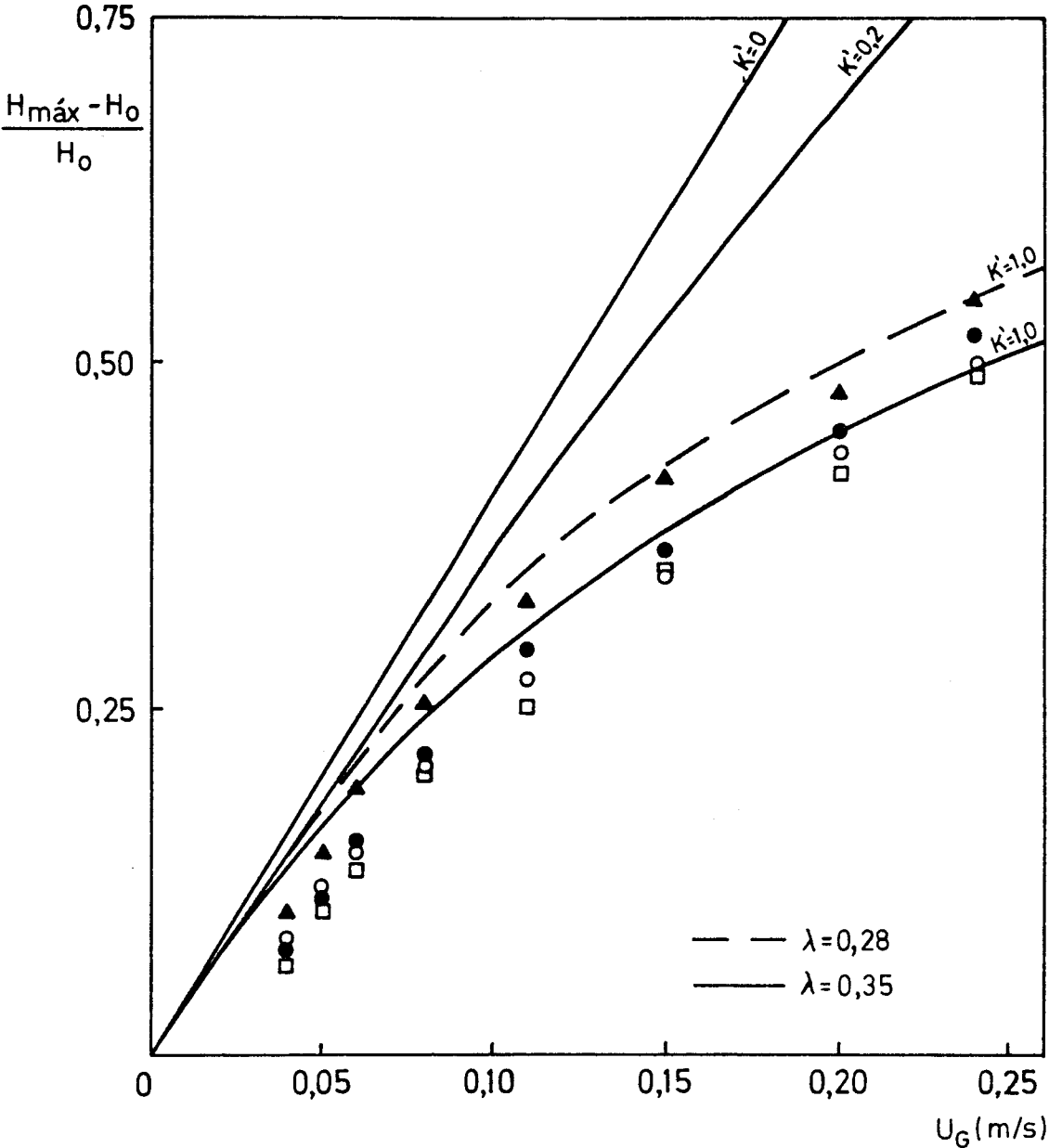
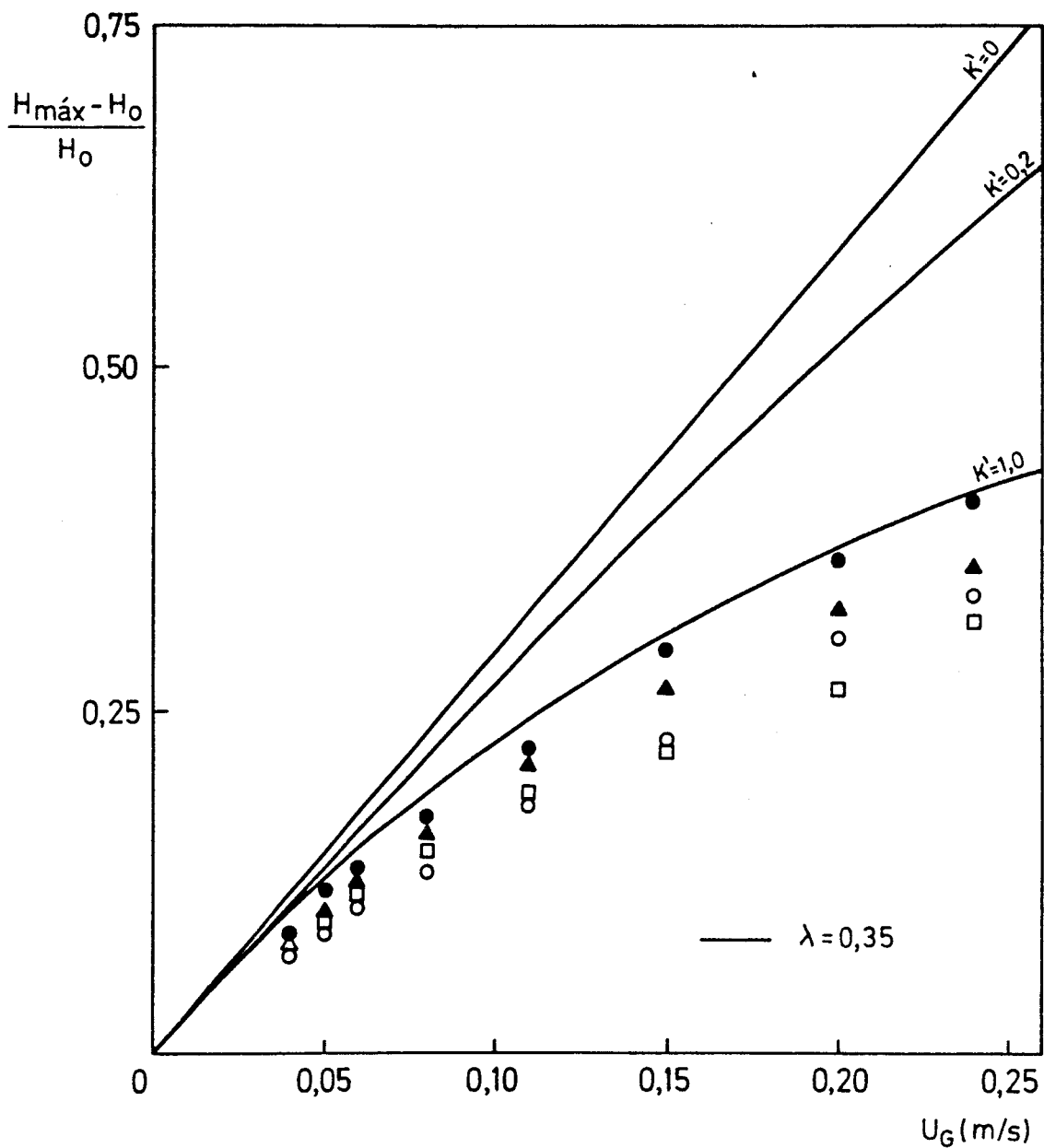


Figura 6.4d - Comparação entre a expansão prevista e a observada experimentalmente, quer numa coluna de borbulhamento gás-líquido de diâmetro 100 mm, quer num leito fluidizado igualmente com 100 mm de diâmetro; $H_0 = 1,10$ m.



	$\nu \times 10^6 \text{ (m}^2/\text{s)}$	$Re (= U_S D / \nu)$	λ
▲	546,0	19,0	0,28
○	89,2	144,0	0,35
◻	60,0	216,0	0,35
●	1,0	$1,3 \times 10^4$	0,35

Figura 6.4e - Comparação entre a expansão prevista e a observada experimentalmente numa coluna de borbulhamento gás-líquido de diâmetro 52 mm; $H_0 = 0,60$ m.



	$\nu \times 10^6 (m^2/s)$	$Re (= U_s D / \nu)$	λ
▲	636,0	54,1	0,35
○	207,0	165,0	0,35
□	89,8	385,0	0,35
●	1,0	3×10^4	0,35

Figura 6.4f - Comparação entre a expansão prevista e a observada experimentalmente numa coluna de borbulhamento gás-líquido de diâmetro 100 mm; $H_0 = 0,60$ m.

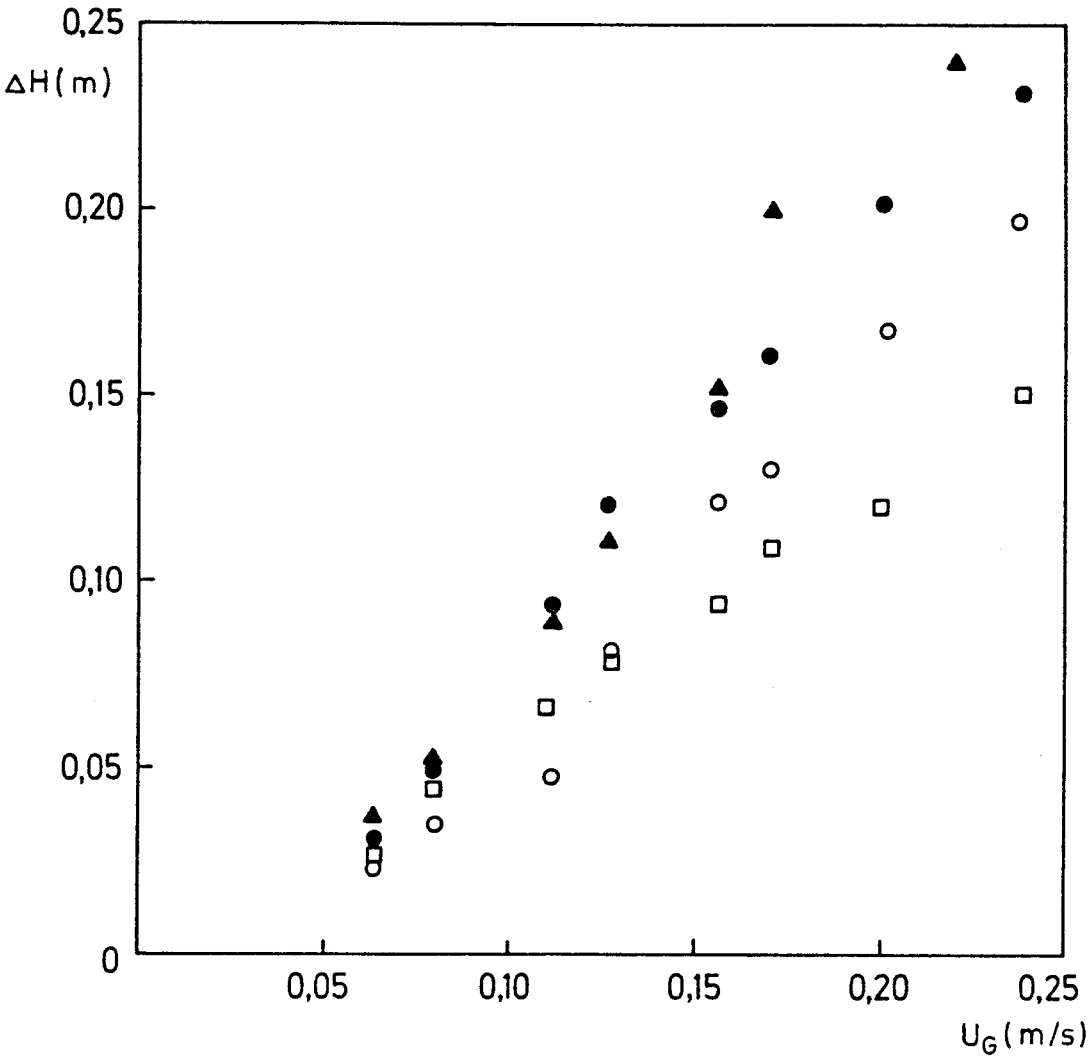
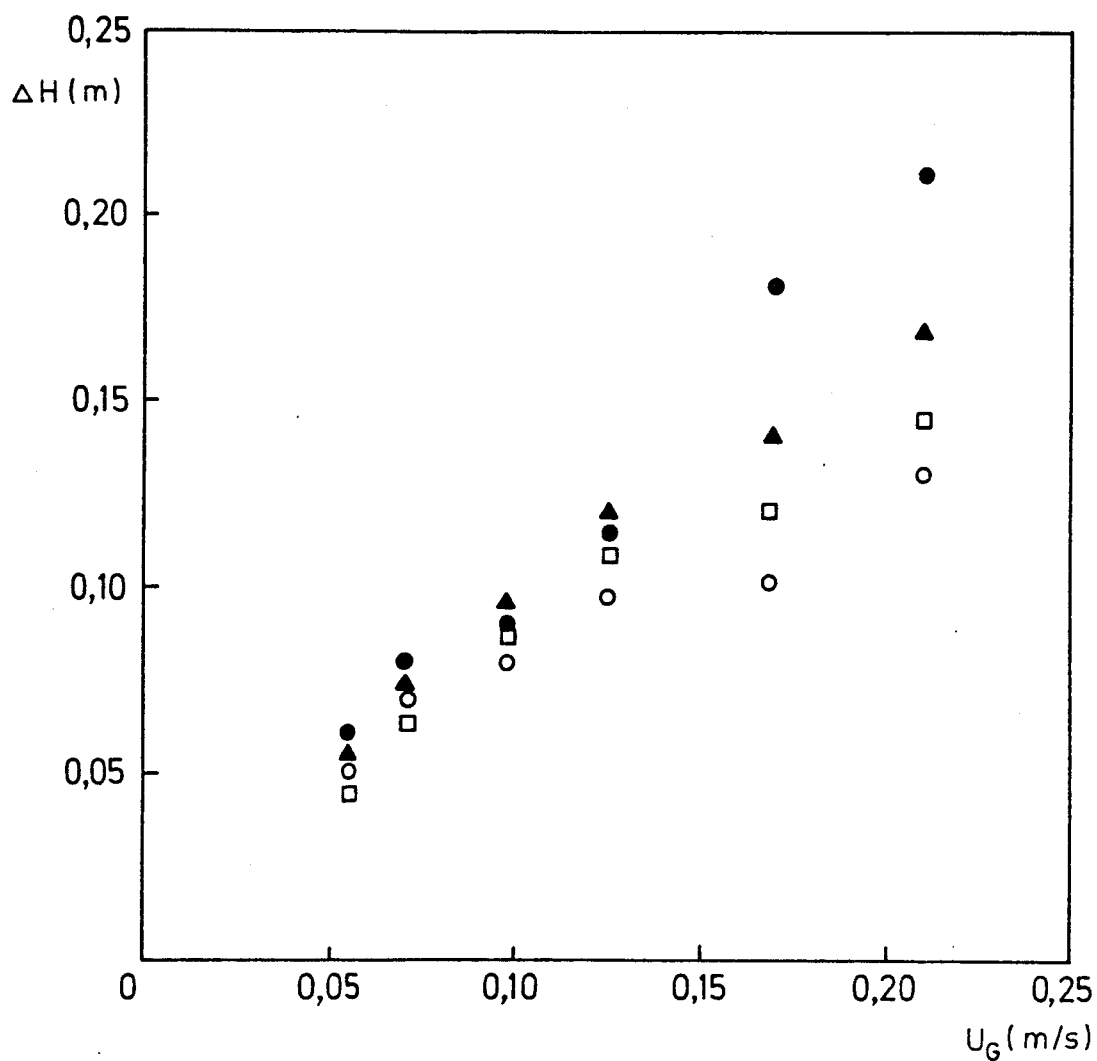
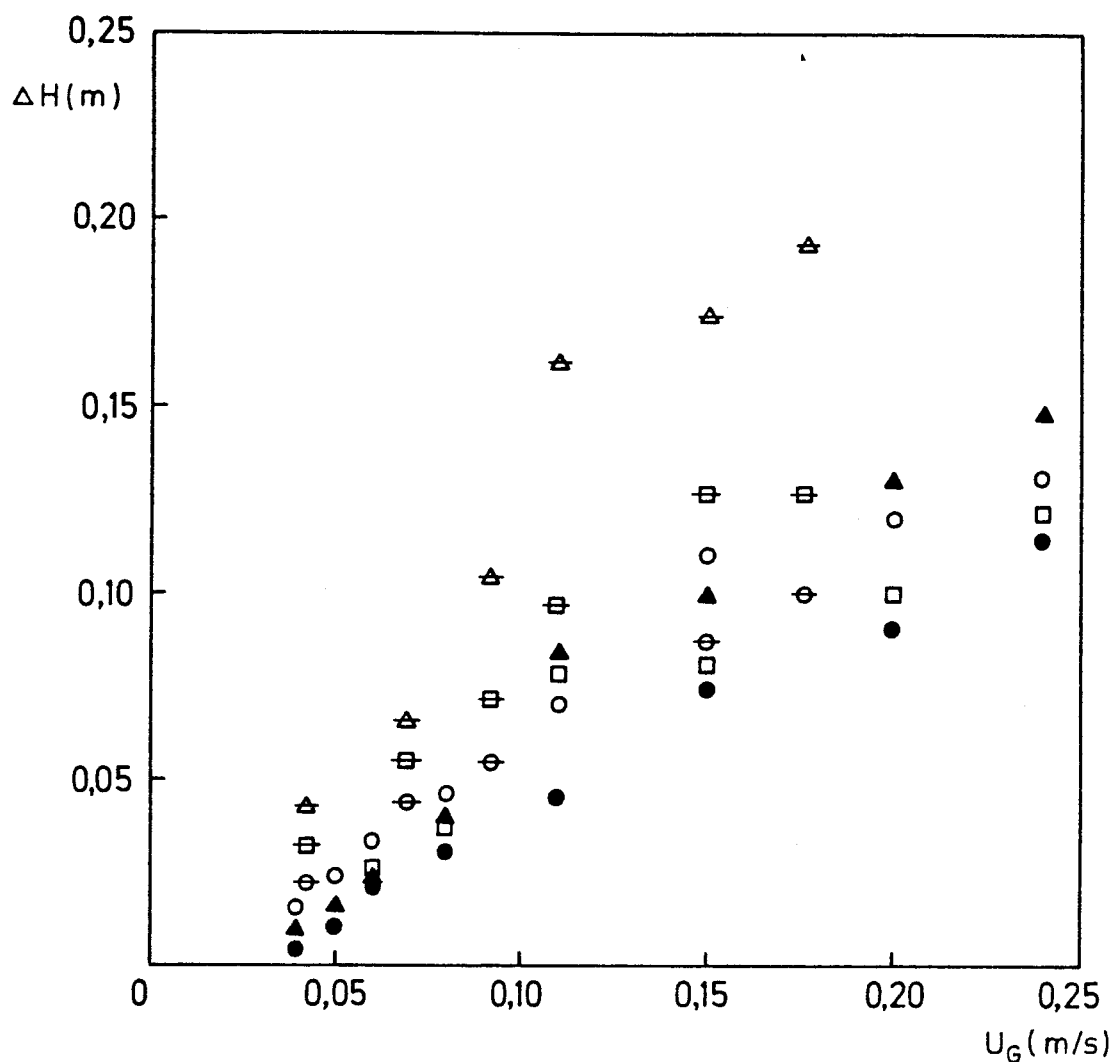


Figura 6.5a - Tamanho dos "slugs" (ΔH) observado experimentalmente numa coluna de borbulhamento gás-líquido de diâmetro 19 mm; $H_o = 1,10$ m.



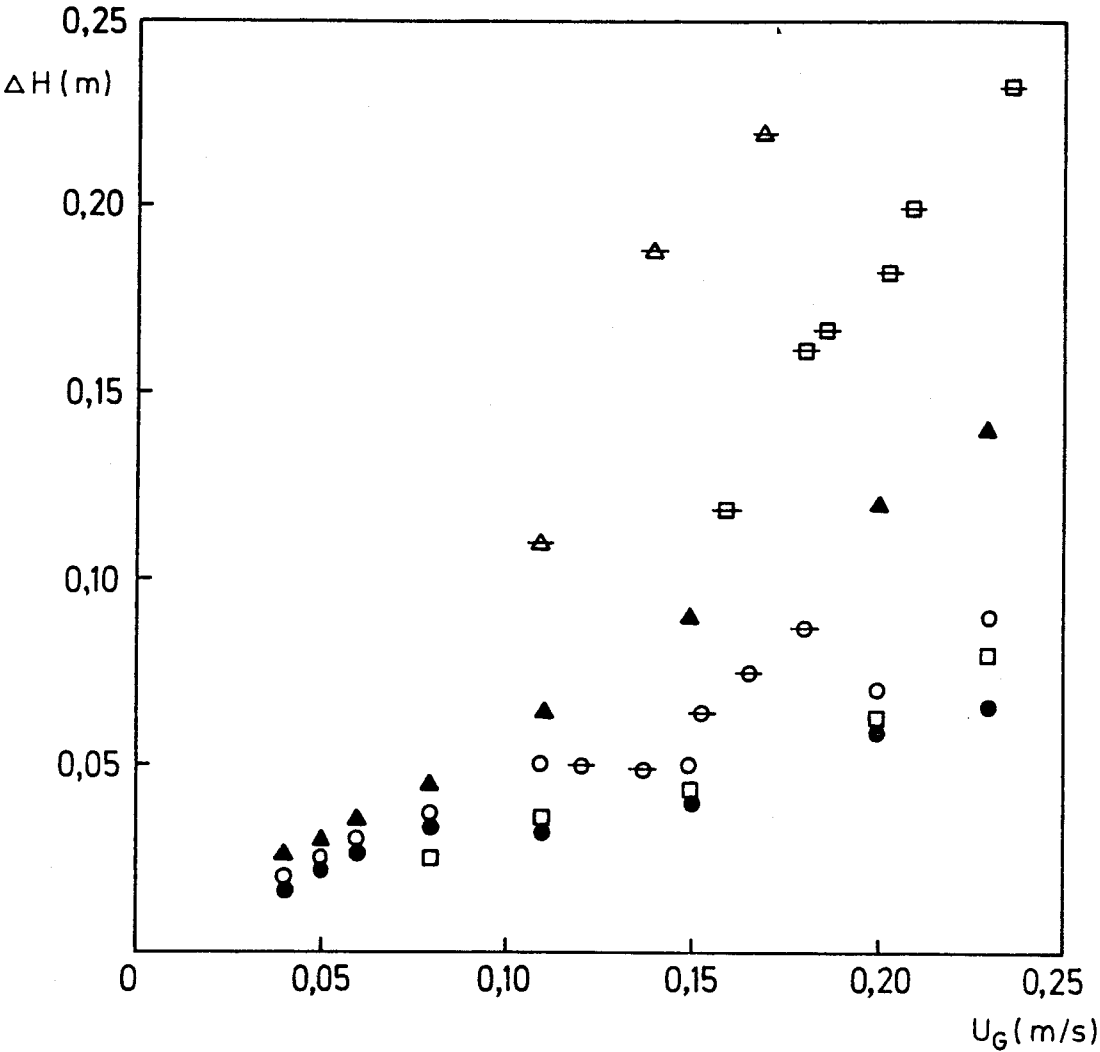
	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)	$Re (=U_S D/\nu)$
▲	585,0	7,4
○	57,2	109,0
◻	29,2	215,0
●	1,0	$6,3 \times 10^3$

Figura 6.5b - Tamanho dos "slugs" (ΔH) observado experimentalmente numa coluna de borbulhamento gás-líquido de diâmetro 32 mm; $H_0 = 1,10$ m.



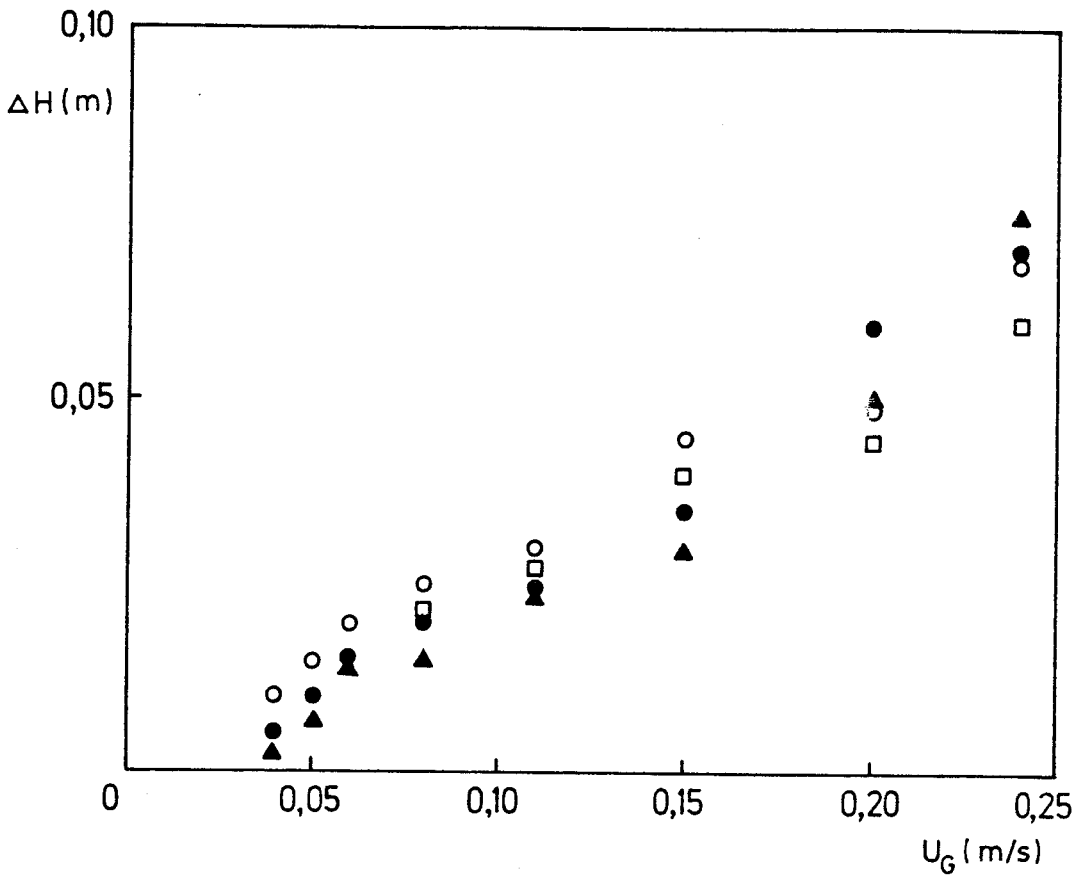
	$\nu \times 10^6 \text{ (m}^2/\text{s)}$	$Re (= U_s D / \nu)$	ε
▲	546,0	19,0	—
○	89,2	144,0	—
□	60,0	216,0	—
●	1,0	$1,3 \times 10^4$	—
⬤	—	—	0,27
⊠	—	—	0,39
⊙	—	—	0,51

Figura 6.5c - Tamanho dos "slugs" (ΔH) observado experimentalmente, quer numa coluna de borbulhamento gás-líquido de diâmetro 52 mm, quer numa coluna com uma suspensão de partículas neutras igualmente com 52 mm de diâmetro; $H_o = 1,10$ m.



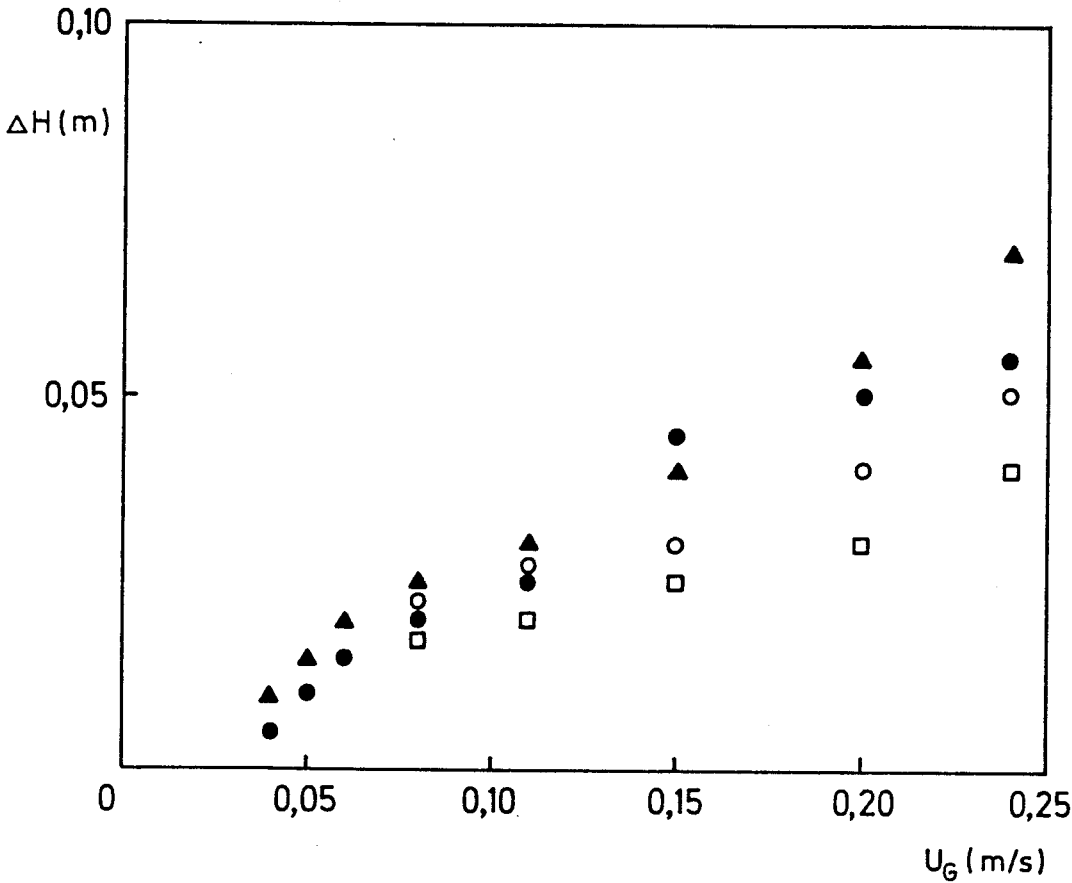
	$\nu \times 10^6 (m^2/s)$	$Re (= U_S D / \nu)$	$P (bar)$
Δ	636,0	54,1	—
$\circ$	207,0	165,0	—
$\square$	89,8	385,0	—
$\circ$	1,0	3×10^4	—
$\triangle$	—	—	1,0
$\boxplus$	—	—	10,0
$\oplus$	—	—	27,0

Figura 6.5d - Tamanho dos "slugs" (ΔH) observado experimentalmente, quer numa coluna de borbulhamento gás-líquido de diâmetro 100 mm, quer num leito fluidizado igualmente com 100 mm de diâmetro; $H_o = 1,10$ m.



	$\Delta \times 10^6 \text{ (m}^2/\text{s)}$	$Re (= U_s D / \Delta)$
▲	546,0	19,0
○	89,2	144,0
□	60,0	216,0
●	1,0	$1,3 \times 10^4$

Figura 6.5e - Tamanho dos "slugs" (ΔH) observado experimentalmente numa coluna de borbulhamento gás-líquido de diâmetro 52 mm; $H_0 = 0,60$ m.



	$\nu \times 10^6 \text{ (m}^2/\text{s)}$	$Re (= U_S D / \nu)$
▲	636,0	54,1
○	207,0	165,0
□	89,8	385,0
●	1,0	3×10^4

Figura 6.5f - Tamanho dos "slugs" (ΔH) observado experimentalmente numa coluna de borbulhamento gás-líquido de diâmetro 100 mm; $H_O = 0,60$ m.

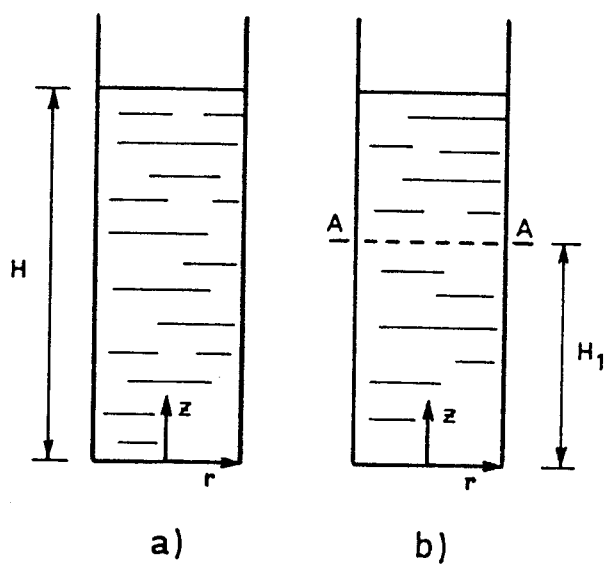


Figura A.1 - a) Representação esquemática da coluna de líquido;
b) Representação (em corte) do plano AA.

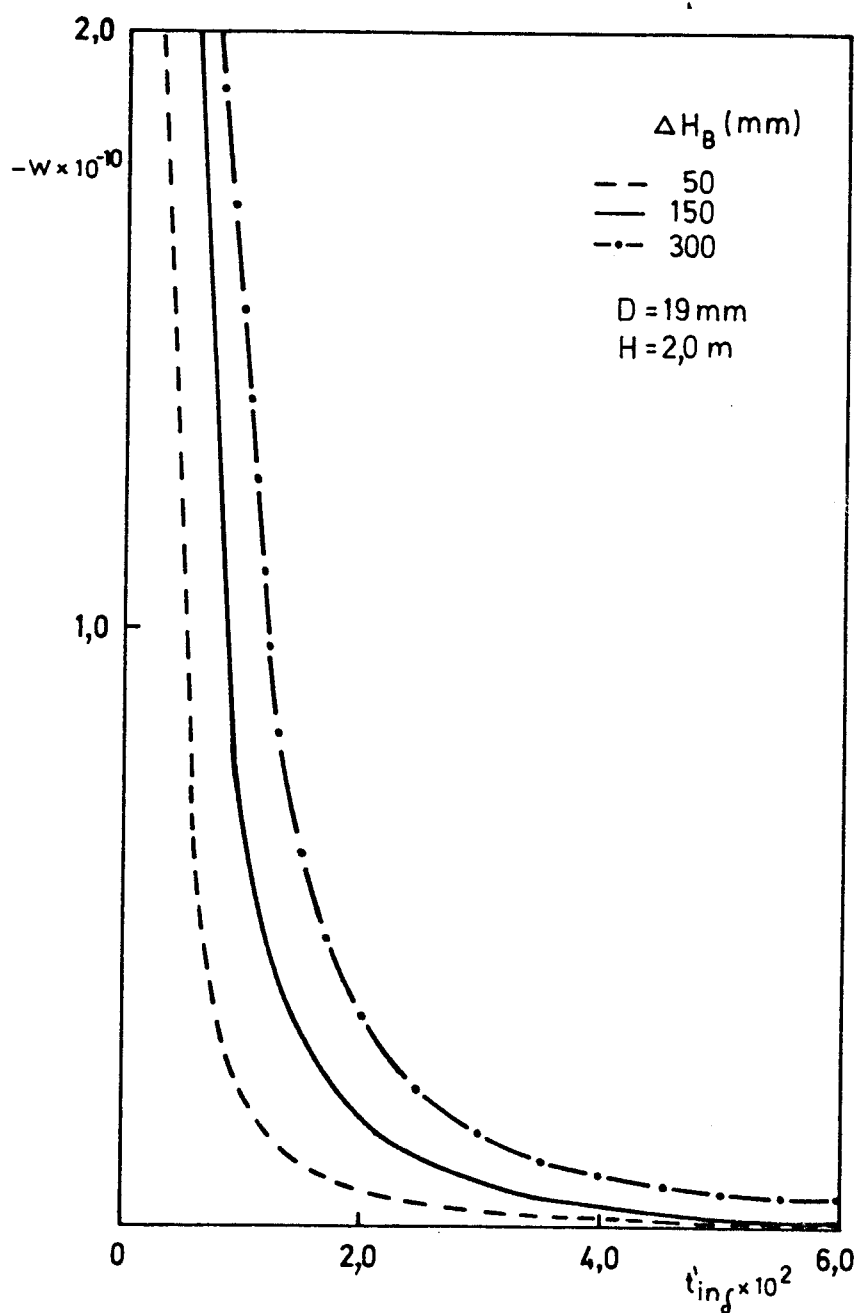


Figura A.2 - Tempo durante o qual uma dada pressão (constante) tem que actuar na base da coluna para produzir um deslocamento médio do líquido ΔH_B ; $W = \frac{H R^2}{\rho U^2} \left(\frac{\Delta P}{H} + \rho g \right)$, $t'_{inj} = t \dot{V} / R^2$.

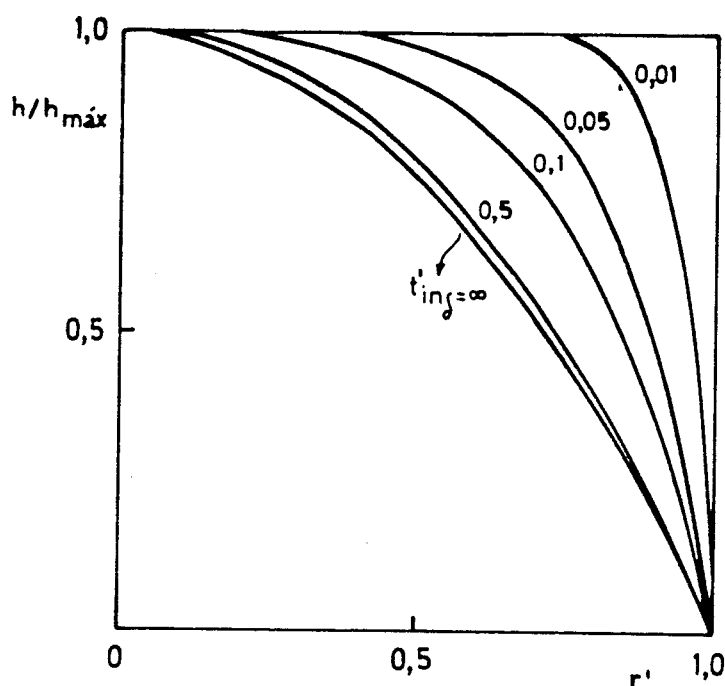


Figura A.3 - Razão entre o deslocamento sofrido por um elemento situado numa posição radial $r' (=r/R)$ e o sofrido por um elemento situado no eixo da coluna ($r'=0$, deslocamento máximo), para diferentes valores do tempo de actuação da pressão (constante) na base da coluna.

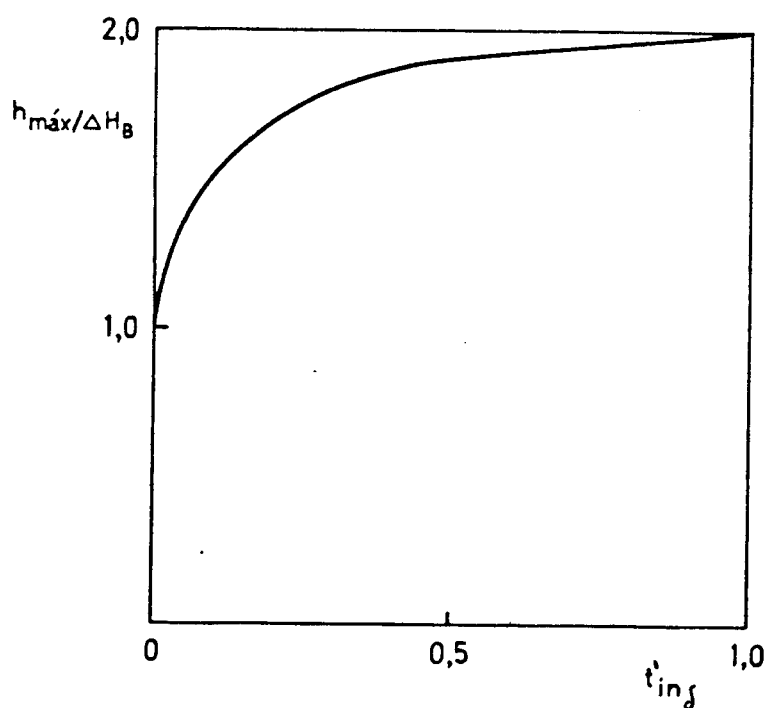


Figura A.4 - Razão entre o deslocamento máximo ($r=0$) e o deslocamento médio sofrido pelo fluido, em função do tempo de actuação da pressão (constante) na base da coluna.

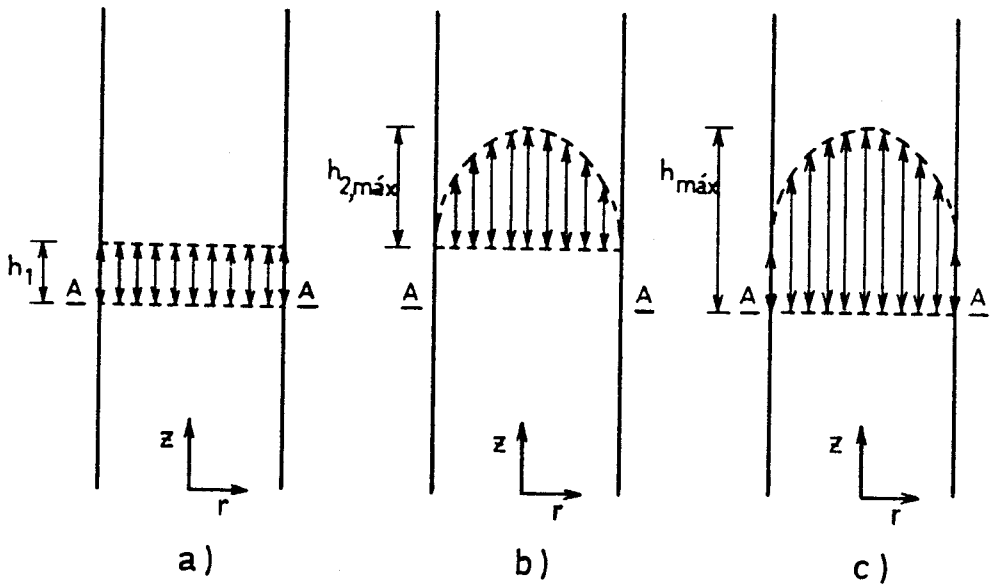


Figura A.5 - Avanço idealizado da coluna de líquido provocado pela injeção do "slug": a) escoamento pistão em que h_1 representa o avanço sofrido; b) escoamento de Poiseuille em que $h_{2,máx}$ representa o avanço máximo sofrido; c) escoamento idealizado em que $h_{máx} (= h_1 + h_{2,máx})$ representa o avanço máximo sofrido.



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000013138