

Paulo T. dos Santos Monteiro

Transporte de Lamas
sob Pressão

DEC
FEUP
1998

FACULDADE DE ENGENHARIA



UNIVERSIDADE DO PORTO

TRANSPORTE DE LAMAS SOB ~~X~~ PRESSÃO

A INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA

DISSERTAÇÃO PARA DOUTORAMENTO EM ENGENHARIA CIVIL
PAULO TENREIRO DOS SANTOS MONTEIRO

LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA
RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTE

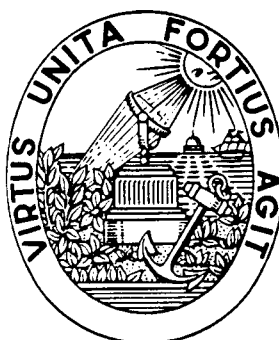
PORTO 1996

PAULO TENREIRO DOS SANTOS MONTEIRO

TRANSPORTE DE LAMAS SOB PRESSÃO

A INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA

Dissertação para Doutoramento em Engenharia Civil
na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



De

FCUP

6261643/110Np/T00

UNIVERSIDADE DO PORTO
Faculdade de Engenharia
BIBLIOTECA F
N.º 6341
CDU
Data / / ID

cat

LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA, RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTE

PORTO, 1996

"O quinto trabalho de que foi incumbido não era mais fácil – limpar as Cavalariças de Augias, no espaço de vinte e quatro horas. Augias possuía milhares de cabeças de gado, cujos estábulos não haviam sido limpos durante anos e anos. Dessa vez, Hércules desviou as águas de dois rios, de modo que corressem pelas cavalariças em torrente caudalosa e, assim, fez desaparecer toda a imúndice num ápice."

Hamilton, Edith – A Mitologia. Lisboa, Publ. D. Quixote, 1983

"αυδρα δ' ὠφελεῖν 'αφ' ὕδατων τέχνης κάλλιστος πόνων"

"O melhor trabalho de um homem é ser útil com a engenharia hidráulica"

(Insp. em Sófocles)

À Zi, Inês e Isabel

PREÂMBULO

É convicção do autor que esta Dissertação constitui o corolário do primeiro ciclo da sua vida académica iniciada em Setembro de 1987 quando, ao terminar a licenciatura em Engenharia Civil, tomou posse como Assistente Estagiário do 3º Grupo de Hidráulica e, em simultâneo, começou a trabalhar como investigador no IHRH – Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos.

As primeiras actividades de investigação na área do hidrotransporte de sólidos ocorreram em 1989 quando se propôs realizar a Dissertação de mestrado subordinada ao estudo do escoamento das lamas produzidas nas ETAR's.

Concluída a Dissertação de mestrado em Julho de 1991, prosseguiu o trabalho de investigação iniciado neste domínio com recurso a técnicas mais avançadas de simulação e medição, agora no âmbito de uma Dissertação de doutoramento e com o apoio financeiro da JNICT – Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica.

Durante o período de nove anos que agora termina, o autor considera que a actividade desenvolvida no IHRH constituiu um factor de importância decisiva na sua valorização profissional, pois permitiu complementar a actividade docente com a participação e coordenação de muitos estudos e projectos nos domínios da hidráulica urbana, sanitária e ambiental que se revelaram fundamentais para a sua formação científica e técnica.

Por este motivo, o autor gostaria, em primeiro lugar, de manifestar o seu reconhecimento às pessoas que, ao longo destes primeiros nove anos de actividade, com o seu exemplo, conselho, e amizade, o ajudaram a ultrapassar as dificuldades do dia a dia e a construir uma base sólida de conhecimentos técnicos e científicos nos domínios da hidráulica, recursos hídricos e ambiente.

Assim, é devido o seu reconhecimento aos Professores Doutores Engº Novais Barbosa, Engº Tentúgal Valente, Engº Veloso Gomes, Engº Poças Martins e Engº Chia Yau Cheng.

Deseja, agora, o autor manifestar o seu agradecimento pelo apoio, ajuda e amizade de todos aqueles que, ao longo da preparação da presente Dissertação, contribuíram para que esta se tornasse uma realidade.

Agradeço, assim:

- ao Professor Doutor Eng^o Tentúgal Valente a supervisão e orientação dos trabalhos efectuados;
- à Doutora Eng^a Maria Fernanda Proença, ao Professor Doutor Eng^o Fernando Pinho e à Professora Doutora Eng^a Alexandra Pinto o apoio dado durante os trabalhos experimentais;
- ao Sr. Jerónimo de Sousa a dedicação e competência que sempre demonstrou na preparação e apoio dos trabalhos experimentais;
- à Câmara Municipal da Maia, nas pessoas do Director Delegado Eng^o Albertino Silva e da Eng^a Assunção Abreu, as facilidades concedidas na utilização da ETAR de Parada-Maia;
- aos familiares e amigos agradeço a compreensão, estímulo e encorajamento tão importantes principalmente nos momentos mais difíceis.

Gostaria de, por último, agradecer à JNICT – Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica – pelo apoio financeiro ao projecto de investigação no âmbito do qual se realizou esta Dissertação e ao IHRH – Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos – o apoio logístico na elaboração da Dissertação.

TRANSPORTE DE LAMAS SOB PRESSÃO A INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA

Paulo Santos Monteiro
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

RESUMO

Nas estações de tratamento de águas residuais, o processo biológico que ocorre no interior dos digestores anaeróbios aquecidos altera substancialmente as características das lamas. Geralmente, essas alterações são, apenas, medidas em termos da concentração (em massa) de sólidos totais e voláteis mas, embora exista pouca informação disponível sobre a evolução de outros parâmetros, nomeadamente, a granulometria das partículas sólidas e o comportamento reológico e hidrodinâmico, sabe-se que ocorrem, também, importantes alterações destes parâmetros no referido processo.

No âmbito dos estudos realizados, construiu-se uma instalação experimental constituída por um digestor anaeróbio aquecido e por um circuito hidráulico fechado que permitiu simular o processo de digestão anaeróbia aquecida das lamas e, em simultâneo, caracterizar o escoamento das lamas tanto em regime laminar como no início do regime turbulento. Ao longo do processo de digestão efectuaram-se, ainda, medições periódicas da granulometria, comportamento reológico, concentração em sólidos totais e voláteis e produção de biogás.

Os resultados obtidos permitem constatar que, após um período de digestão de cerca de 40 dias, a percentagem de sólidos voláteis baixou de cerca de 78% para 70% dos sólidos totais. Por sua vez, o diâmetro médio das partículas sólidas passou de 40 μm para cerca de 25 μm e a tensão de cedência, o coeficiente de consistência e o índice de potência (n), obtidos a partir da aplicação do modelo de Herschell-Bulkley aos resultados obtidos nos ensaios reológicos, apresentaram, também, importantes modificações tendo variado, respectivamente, entre 0,9 e 0,3 N/m^2 , 0,6 e 0,002 Ns^n/m^2 e 0,4 e 1,25.

Conclui-se, ainda, que a alteração das características das lamas é mais rápida na fase inicial do processo de digestão, atribuindo-se este facto à grande influência que as macromoléculas orgânicas rapidamente biodegradáveis têm nas características do escoamento. Após este período inicial de cerca de uma semana, a variação dos diferentes parâmetros passa a ser progressivamente mais lenta convergindo para um valor limite. Esta fase corresponde à assimilação biológica das substâncias orgânicas mais complexas. No entanto, a decomposição biológica dos sólidos orgânicos de maior dimensão presentes na lama parece ser pouco significativa ao longo de todo o processo.

PIPELINE TRANSPORT OF SLUDGES THE INFLUENCE OF THE ANAEROBIC DIGESTION PROCESS

Paulo Santos Monteiro
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

ABSTRACT

It is well known that the biological process taking place inside a heated anaerobic digester modifies in many aspects the structure of the sludges (Metcalf & Eddy - 1991). Usually those changes are only measured in terms of mass concentration of total and volatile solids, however other characteristics such as the solids granulometry, rheological and hydrodynamic behaviour also show important changes which are not so well understood.

In this study, a test facility, including a heated digester and a pipe rig, was set up to simulate the sewage sludge digestion and to characterize the sludge flow both in laminar and in the beginning of the turbulent flow regimes. During sludge digestion, periodic measurements of the granulometry, rheological characteristics, mass concentration of total and volatile solids and gas production were, also, made.

After a period of anaerobic digestion of about 40 days, the volatile solids concentration reduced from about 78% to 70%, while the average particle size dropped from 40 μm to 25 μm and the yield stress, the consistency coefficient and the flow behaviour index (n) of the Herschell-Bulkley model changed, respectively, from 0,9 to 0,3 N/m^2 , 0,6 to 0,002 Ns^n/m^2 and 0,4 to 1,25.

The experiments also showed that the changes in the sludges characteristics were faster in the early stages of the digestion. This fact suggests that the quickly biodegradable organic macromolecules, which are dissolved in the liquid fraction, have a strong influence in the flow characteristics. After this initial period of about one week, the parameters change slower, converging to an asymptote. In this final period of the biological process, the more complex organic substances presented in the sludge, both soluble and insoluble, are decomposed but it seems that the breakdown of the organic solids of larger dimension by biological degradation is only marginal

LE TRANSPORT SOUS PRESSION DES BOUES L'INFLUENCE DU PROCÉDÉ DE DIGESTION ANAÉROBIQUE

Paulo Santos Monteiro

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

RÉSUMÉ

Dans les stations d'épuration des eaux résiduelles, le procédé biologique qui a lieu à l'intérieur des digesteurs anaérobiques chauffés, change beaucoup les caractéristiques des boues. En général ces modifications sont mesurées, seulement, par la concentration (en masse) des solides totaux et volatiles, mais il y a d'autres paramètres tels que la granulometrie des particules solides et le comportement réologique et hydrodynamique, qui présentent aussi des modifications très importantes et qui ne sont pas, souvent, bien comprises.

En vue de la mise en pratique des études, une installation expérimentale dotée d'un digesteur chauffé et d'un circuit hydraulique fermé a été construite. Cette installation a été préparée de façon à simuler le procédé de digestion anaérobie des boues et, en même temps, étudier l'écoulement des boues dans le régime laminaire et pendant la phase initiale du régime turbulent. Au cours de la digestion on a fait des mesures périodiques de la granulometrie, réologie, concentration en solides totaux et volatiles et production de biogàs.

Après une période d'environ 40 jours, la concentration des solides volatiles c'est réduite de 78% pour 70% des solides totaux. Aussi, la dimension moyenne des particules solides c'est réduite de 40 μm pour 25 μm et la tension de cédence, le coefficient de consistance et l'index de puissance (n), obtenus par l'application du modèle d'Herschell-Bulkley aux résultats, ont changé, respectivement, de 0,9 à 0,3 N/m^2 , 0,6 à 0,002 Ns^n/m^2 et 0,4 à 1,25.

Les résultats obtenus ont aussi montré que l'altération des caractéristiques des boues est plus rapide pendant la phase initiale du procédé de digestion, vue que les macromolécules organiques dissolues dans la fraction liquide et de biodégradation rapide influencent beaucoup les caractéristiques de l'écoulement. Après cette première période d'environ une semaine, la variation des paramètres devient progressivement plus petite et converge vers une limite. Cette période finale, correspond à l'assimilation biologique des matières organiques plus complexes, mais il semble que les solides de plus grandes dimensions ne subissent pas une grande altération au cours du procédé.

SUMÁRIO

	pág.
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – ESTUDOS ANTECEDENTES	7
CAPÍTULO 3 – ORIGEM, TRATAMENTO E DESTINO FINAL DAS LAMAS	13
CAPÍTULO 4 – REOLOGIA DAS LAMAS	55
CAPÍTULO 5 – ESCOAMENTO DAS LAMAS	97
CAPÍTULO 6 – ESTUDOS EXPERIMENTAIS	151
CAPÍTULO 7 – ANÁLISE DOS RESULTADOS	199
CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES	257
BIBLIOGRAFIA	261
ÍNDICE	269
ÍNDICE DE FIGURAS	275
ÍNDICE DE QUADROS	285
ANEXO A – RESULTADOS OBTIDOS NOS ESTUDOS HIDRODINÂMICOS	
ANEXO B – RESULTADOS OBTIDOS NOS ESTUDOS REOLÓGICOS	
ANEXO C – RESULTADOS OBTIDOS NOS ESTUDOS GRANULOMÉTRICOS	

SIMBOLOGIA

LETRAS LATINAS MAIÚSCULAS

A	grandeza genérica
A_n	grandeza genérica função do índice de potência
A_{In}	grandeza genérica função do índice de potência
A_p	área projectada num plano perpendicular ao do movimento de uma partícula sólida em sedimentação
ADN	ácido desoxirribonucleico
ARN	ácido ribonucleico
B	coeficiente de <i>Einstein</i> ; grandeza genérica
B_n	grandeza genérica função de n
C	grandeza genérica
C_c	coeficiente de curvatura
C_u	coeficiente de uniformidade
C_1	constante de integração
C_D	coeficiente de arrastamento
C_s	coeficiente de <i>Skelland</i>
C_n	grandeza genérica função do índice de potência
CBO_5	carência bioquímica de oxigénio aos cinco dias
CQO	carência química de oxigénio
D	diâmetro de uma conduta
D_{10}	diâmetro das partículas correspondente a 10% de ocorrências acumuladas
D_{30}	diâmetro das partículas correspondente a 30% de ocorrências acumuladas
D_{60}	diâmetro das partículas correspondente a 60% de ocorrências acumuladas
D_v	diâmetro do cilindro exterior no " <i>vane test</i> "
E	módulo de elasticidade de um corpo sólido
ETAR	estação de tratamento de águas residuais
E_r	razão entre os raios dos cilindros exterior e interior nos cilindros rotativos
F_n	grandeza genérica função do índice de potência (fórmula de <i>Irvine</i> e fórmula de <i>Torrance</i>)
F_{KM}	coeficiente de <i>Krieger–Maron</i>
$\vec{F}$	força

$\vec{F}_g$	força gravítica actuante sobre uma partícula em sedimentação
$\vec{F}_a$	força de atrito actuante sobre uma partícula em sedimentação
G	grandeza medida nos ensaios experimentais
H	energia mecânica total
He	número de <i>Hedstrom</i>
J	perda de carga contínua
K	coeficiente de consistência
K_D	grandeza genérica característica do fluido
K_{DR}	grandeza genérica dependente da evolução do processo de colapso estrutural do fluido
K_T	grandeza genérica (fórmula de <i>Thomas</i>)
K_c	constante de proporcionalidade de <i>Collins e Schowater</i>
$(K_c)_B$	constante de proporcionalidade de <i>Michiyoshi, Mizuno e Hoshiai</i>
K_{loc}	coeficiente de perda de carga localizada
K_λ	razão entre o coeficiente de perda de carga em regime turbulento liso-rugoso ou rugoso e o coeficiente de perda de carga em regime turbulento liso em fluidos <i>Newtonianos</i>
K	coeficiente de consistência de <i>Metzner e Reed</i>
L	distância entre dois pontos ou entre duas secções
L_c	comprimento de estabelecimento do escoamento
M_s	massa de sólidos totais
M_{sf}	massa de sólidos fixos
M_{sv}	massa de sólidos voláteis
N	velocidade de rotação
NTK	azoto total de <i>Kjeldhall</i>
O	origem dos sistemas de eixos coordenados
P_n	grandeza genérica função do índice de potência
Q	caudal
R	raio de uma conduta
R_c	raio do cone
Re	número de <i>Reynolds</i> de um fluido <i>Newtoniano</i>
Re_B	número de <i>Reynolds</i> de <i>Bingham</i>
Re_{MR}	número de <i>Reynolds</i> de <i>Metzner e Reed</i>
Re_g	número de <i>Reynolds</i> generalizado
Re_ϕ	número de <i>Reynolds</i> da partícula sólida em sedimentação
Re_{To}	número de <i>Reynolds</i> de <i>Tomita</i>
$(Re_B)_{To}$	número de <i>Reynolds</i> de <i>Tomita</i> para fluidos plásticos de <i>Bingham</i>

Re_{c1}	número de <i>Reynolds</i> crítico inferior
Re_{c2}	número de <i>Reynolds</i> crítico superior
$(Re_g)_{c1}$	número de <i>Reynolds</i> generalizado crítico inferior
$(Re_g)_{c2}$	número de <i>Reynolds</i> generalizado crítico superior
$(Re_B)_{c1}$	número de <i>Reynolds</i> de <i>Bingham</i> crítico inferior
$(Re_B)_{c2}$	número de <i>Reynolds</i> de <i>Bingham</i> crítico superior
S	área da secção de escoamento; secção; superfície
S_i	secção genérica de uma conduta
SI	sólidos inorgânicos
SST	sólidos em suspensão totais
ST	sólidos totais
SV	sólidos voláteis
T	torção
T_s	tensão superficial
T_i	componente genérica da tensão superficial
U	velocidade média de um escoamento
U_{c1}	velocidade média do escoamento no instante em que termina o regime laminar
U_i	velocidade média numa secção genérica da conduta
$U.$	velocidade de atrito
V	volume; tensão eléctrica
V_L	volume de lamelas
Z	altura imersa do cone no " <i>Cone Penetration Test</i> "; parâmetro de estabilidade de <i>Ryan e Johnson</i>

LETRAS LATINAS MINÚSCULAS

a_i	componente genérica da aceleração
$\vec{a}$	aceleração
b	coeficiente de distribuição de pressões; grandeza genérica (equação de <i>Cross</i> e fórmula de <i>Thomas</i>)
c	grandeza genérica (fórmula de <i>Darby e Melson</i>)
d	derivada total
dr	distância infinitesimal

d_{st}	densidade dos sólidos totais
d_{sf}	densidade dos sólidos fixos
d_{sv}	densidade dos sólidos voláteis
d_v	largura das pás no dispositivo utilizado no " <i>vane test</i> "
f	função
f_F	coeficiente de atrito de <i>Fanning</i>
f_{To}	coeficiente de atrito de <i>Tomita</i>
$(f_B)_{To}$	coeficiente de atrito de <i>Tomita</i> em fluidos plásticos de <i>Bingham</i>
g	módulo da aceleração da gravidade
$\vec{g}$	aceleração da gravidade
g_i	componente genérica da aceleração da gravidade
j	trabalho realizado por unidade de peso e de percurso pelas forças resistentes (equação local de <i>Bernoulli</i>)
k	coeficiente de elasticidade de uma mola; constante de proporcionalidade do comprimento de mistura
k_r	dimensão média das rugosidades da conduta
ℓ	comprimento
ℓ_m	comprimento de mistura
m	massa; grandeza genérica (equação de <i>Cross</i>)
n	índice de potência
n'	tangente à curva que representa em escala logarítmica a relação entre a tensão tangencial e a velocidade de deformação angular
n''	tangente à curva que representa em escala logarítmica a relação entre a torção e a velocidade de rotação
$\vec{n}$	valor da normal
n_i	componente genérica do versor da normal
$\bar{n}$	índice de potência de <i>Metzner e Reed</i>
p	pressão
p_i	pressão numa secção genérica da conduta
r	distância ao eixo da conduta
r_c	distância ao eixo do cone
r_i	raio de um cilindro genérico
r_c	distância entre o eixo da conduta e o ponto onde $\tau=\tau_c$
r	r/R
s	comprimento de arco de uma trajectória
sb	saída binária do conversor de sinal analógico/digital

t	tempo
v	velocidade instantânea
v^+	velocidade adimensional
$\vec{v}$	vector velocidade num ponto
v_d	velocidade de deslizamento
v_i	componente genérica da velocidade
v_s	velocidade de sedimentação de uma partícula sólida
$v(r)$	velocidade num ponto do escoamento a uma distância r do eixo da conduta
x	cociente entre a tensão de cedência e a tensão na parede da conduta; coordenada de um sistema de eixos coordenados ortogonais
x_{cl}	valor de x no instante em que termina o regime laminar
x_{elast}	deformação sofrida por uma mola
x_{visc}	deformação sofrida por um êmbolo
x_{total}	deformação total
x_i	coordenada segundo o eixo Ox_i de um sistema de eixos coordenados ortogonais
y	coordenada de um sistema de eixos coordenados ortogonais
y^+	comprimento adimensional
y_2^+	distância da fronteira sólida a que tem início a camada limite turbulenta
z	energia potencial de posição por unidade peso
z_i	energia potencial de posição por unidade de peso numa secção genérica da conduta

LETRAS GREGAS MAIÚSCULAS

ΔB	aumento de carga
ΔH_{cont}	perda de carga contínua
ΔH_{loc}	perda de carga localizada
ΔP	diferença de pressão entre duas secções do escoamento
Φ	fracção sólida

LETRAS GREGAS MINÚSCULAS

α	ângulo; coeficiente de energia cinética
α'	coeficiente de quantidade de movimento
γ	peso volúmico do fluido
δ	derivada parcial

ε	deformação elástica relativa de um corpo sólido
ζ	coeficiente de proporcionalidade no " <i>Cone Penetration Test</i> "
λ	coeficiente de perda de carga
λ_N	coeficiente de perda de carga de fluidos <i>Newtonianos</i>
$(\lambda_N)_{\text{Liso}}$	coeficiente de perda de carga de fluidos <i>Newtonianos</i> em regime turbulento liso
$(\lambda_N)_{\text{Rug.}}$	coeficiente de perda de carga de fluidos <i>Newtonianos</i> em regime turbulento rugoso
$(\lambda_N)_{\text{Liso-Rug.}}$	coeficiente de perda de carga de fluidos <i>Newtonianos</i> em regime turbulento de transição liso-rugoso
λ_{nN}	coeficiente de perda de carga de fluidos não <i>Newtonianos</i>
λ_{c1}	coeficiente de perda de carga no instante em que termina o regime laminar
μ	coeficiente de viscosidade dinâmico de fluidos <i>Newtonianos</i>
μ_f	coeficiente de viscosidade dinâmico da parcela fluida de uma suspensão
η	coeficiente de viscosidade dinâmico generalizado
η_B	coeficiente de rigidez (coeficiente de viscosidade dinâmico em fluidos plásticos de <i>Bingham</i>)
η_0	coeficiente de viscosidade generalizado quando $dv/dr \rightarrow 0$
η_∞	coeficiente de viscosidade generalizado quando $dv/dr \rightarrow \infty$
ρ	massa volúmica do fluido
$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$	massa volúmica da água
ρ_L	massa volúmica das lamelas
ρ_f	massa volúmica da componente líquida da suspensão
ρ_s	massa volúmica da componente sólida da suspensão
τ	tensão
τ_c	tensão de cedência
τ_{c0}	tensão de cedência quando $t \rightarrow 0$
$\tau_{c\infty}$	tensão de cedência quando $t \rightarrow \infty$
τ_{ij}	tensor das tensões
τ_n	componente da tensão tangencial devida à componente <i>Newtoniana</i> do fluido
τ_e	componente da tensão tangencial devida à existência de uma estrutura interna no fluido
τ_{et}	componente da tensão tangencial devida à existência de uma estrutura interna no fluido, num dado instante
τ_{c0}	componente da tensão tangencial devida à existência de uma estrutura interna no fluido, quando $t=0$
τ_{c1}	componente da tensão tangencial devida à existência de uma estrutura interna no fluido, quando $t=1$ minuto
$\tau_{c\infty}$	componente da tensão tangencial devida à existência de uma estrutura interna no fluido, quando $t \rightarrow \infty$

$\tau_{\text{lim elast}}$	tensão limite de elasticidade de um corpo sólido
τ_p	tensão tangencial junto à parede da conduta
$(\tau_p)_{c1}$	tensão tangencial junto à parede da conduta no instante em que termina o regime laminar
τ_r	tensão a uma distância r do eixo da conduta
$\tau(r)$	tensão a uma distância r do eixo do cilindro
θ	ângulo do cone
ϕ	diâmetro de uma partícula sólida
ϕ_a	diâmetro aparente de uma partícula sólida
Φ_V	factor de forma adimensional

1. INTRODUÇÃO

O hidrotransporte de sólidos é uma área do conhecimento que tem sido, recentemente, objecto de um relevante esforço de pesquisa motivado, em grande parte, pela procura de soluções alternativas economicamente mais favoráveis e menos penalizantes do meio ambiente para a problemática do destino final das lamas produzidas nas ETAR's.

Efectivamente, o transporte de materiais sólidos a médias e grandes distâncias é necessário em actividades tão diversas como a prospecção mineira, as dragagens, o desembarçamento de resíduos e, mesmo, em algumas actividades industriais como, por exemplo, a produção de pasta de papel e a indústria cerâmica.

Em alguns casos, os elevados volumes dos materiais e a perigosidade para a saúde pública e para o meio ambiente em geral dos produtos a transportar, colocam problemas de monta às entidades responsáveis pelo seu manejo, obrigando a efectuar vultuosos investimentos tanto na implantação como na exploração desses sistemas, de modo a garantir a sua condução em segurança até um determinado destino final susceptível de ser aceite por todos os agentes envolvidos.

A solução vulgarmente utilizada para proceder ao transporte destes materiais assenta nos meios de transporte terrestres ou fluviais convencionais, isto é, camiões, comboios ou barcas. Em alguns casos, contudo, tem-se revelado mais vantajoso o hidrotransporte por bombagem em condutas sob pressão dos sólidos previamente triturados. Em particular, o transporte de carvão ou minério de ferro desde os locais de produção até, respectivamente, à central térmica e siderurgia pode, em alguns casos, obrigar à construção de vias de comunicação exclusivas para essa finalidade o que eleva, substancialmente, os custos de primeiro investimento e de exploração e conduz a problemas ambientais de difícil solução. Por outro lado, mesmo quando existam vias de comunicação adequadas, a circulação intensiva de veículos transportando estes materiais conduz a um desgaste elevado e prematuro dessas vias e, muitas vezes, a uma saturação prematura das condições de utilização.

O transporte de lamas resultantes do tratamento de águas residuais, tanto urbanas como industriais, tem assumido, progressivamente, uma importância crescente. Efectivamente, a defesa do meio ambiente é um objectivo cada vez mais interiorizado pelas populações, indústrias e entidades governamentais e, por isso, a construção de sistemas de tratamento para os resíduos produzidos registou, recentemente, um grande incremento.

As estações de tratamento de águas residuais, em notação abreviada ETAR's, são uma das infraestruturas necessárias para a protecção ambiental e, em particular, da qualidade da água. Contudo, os processos de tratamento de águas residuais conhecidos e normalmente utilizados nas estações de tratamento produzem, em geral, quantidades apreciáveis de lamas que têm de ser submetidas a um adequado tratamento antes de serem colocadas num destino final aceitável tanto em termos ambientais como sanitários.

A problemática do transporte das lamas produzidas em estações de tratamento de águas residuais a distâncias relativamente elevadas é bastante recente pois, no passado, não existiam grandes restrições ao seu desembarçamento. Assim, por exemplo, o lançamento de lamas no mar foi uma solução muito utilizada,

principalmente no *Reino Unido* e nos *EUA*. Por sua vez, a aplicação de lamas nos solos e a sua colocação em aterros sanitários constituíram, também, uma prática comum. Mais recentemente, devido aos volumes cada vez maiores de lamas produzidas e à crescente dificuldade existente no seu eficaz desembaraçamento, desenvolveram-se sistemas de combustão desses resíduos em centrais incineradoras ou por pirólise em conjunto com os resíduos sólidos urbanos.

Os crescentes obstáculos legais à deposição não controlada das lamas em locais ambientalmente sensíveis ou pondo em risco o equilíbrio ambiental existente, conduziu, já, à interdição da utilização do mar como meio receptor para as lamas e a restrições importantes à utilização das lamas com fins agrícolas. Estas medidas obrigam a repensar a problemática do destino final das lamas produzidas nas estações de tratamento, na medida em que inviabilizam a continuidade das soluções já implantadas com custos económicos, em geral, baixos mas com custos ambientais demasiado elevados. A análise de soluções alternativas para o tratamento e desembaraçamento final das lamas poderá estar, por isso, associada à necessidade de criar centrais de tratamento especificamente vocacionadas para esse fim que centralizem o processamento das lamas produzidas numa região obrigando a efectuar o transporte das lamas desde os locais de produção até aos de processamento para, posteriormente, se proceder ao seu desembaraçamento final, de uma forma controlada e respeitadora do ambiente.

Por serem suspensões de sólidos em água, a problemática do transporte das lamas deve ser equacionada de uma maneira semelhante à referida, anteriormente, para outros materiais sólidos. No entanto, ao contrário dos casos citados, as lamas são já recolhidas nas estações de tratamento na forma de suspensões mais ou menos concentradas e é, em geral, bastante difícil reduzir o seu teor de humidade até valores comparáveis com os das restantes suspensões referidas.

Apresentam-se, assim, como soluções viáveis para o transporte das lamas, o recurso a veículos preparados para transportar líquidos ou, em alternativa, o seu escoamento em condutas até à central de processamento. Uma escolha sobre qual dos dois processos é o mais conveniente, ou economicamente mais vantajoso, exige o conhecimento das condições em que se realiza o escoamento das lamas em condutas sob pressão, o que passa por conhecer o seu comportamento reológico e hidrodinâmico de modo a permitir o dimensionamento optimizado do sistema de transporte das lamas e a quantificação mais rigorosa dos custos associados a esse transporte.

Este tipo de abordagem, para além de permitir estudar soluções alternativas para o problema cada vez mais actual do transporte de lamas a médias ou grandes distâncias, permite, também, aprofundar o conhecimento sobre o transporte das lamas em condutas no interior das estações de tratamento, melhorando, deste modo, o funcionamento dos órgãos de tratamento de lamas existentes nas ETAR's e que são, em geral, responsáveis por uma grande parte dos problemas de operação existentes.

No entanto, enquanto que as condutas que realizam o transporte das lamas no interior das estações de tratamento têm em geral muito pequena extensão e, por isso, é razoável aplicar metodologias simplificadas para quantificação das perdas de carga do escoamento (em geral 1,5 a 2,5 vezes o valor da perda de carga no escoamento de água), quando o comprimento das condutas atinge maiores dimensões, esta metodologia

deixa de ter validade e passa a ser necessário conhecer com maior rigor as características reais do escoamento das lamas.

Verifica-se, contudo, que a informação existente relativa ao comportamento reológico e hidrodinâmico das lamas produzidas nas ETAR's é bastante vaga, confusa e, por vezes, contraditória o que dificulta bastante a tarefa do dimensionamento destes sistemas.

Os estudos desenvolvidos no âmbito da presente Dissertação procuraram desenvolver metodologias adequadas e o mais próximas possíveis das situações reais existentes nos casos práticos, para estabelecer critérios fiáveis e seguros que permitam o conhecimento do comportamento reológico e hidrodinâmico das lamas, relacionando-o com as suas características físicas, químicas e biológicas e tendo em vista a fixação de parâmetros concretos que permitam o conhecimento correcto das condições em que se efectua o transporte destes fluidos em condutas sob pressão.

As soluções preconizadas na presente Dissertação baseiam-se em resultados experimentais obtidos numa instalação, onde se procurou simular o processo de digestão anaeróbia aquecida das lamas tal como ocorre nas estações de tratamento de modo a avaliar a relação que existe entre o processo biológico de digestão anaeróbia, a dissipação de energia medida em testes hidrodinâmicos e o comportamento reológico e granulométrico medidos, respectivamente, num reómetro e num granulómetro laser.

Para tal simulação, importa referir que a *ETAR de Parada, na Maia*, foi o único local de recolha das lamas analisadas no decurso da fase experimental, apresentando-se, em seguida, as razões desta decisão.

Em primeiro lugar deve-se referir que a *ETAR de Parada* é a única estação de tratamento em funcionamento, na região do *Porto*, com dimensão significativa (em termos de número de habitantes servidos) e, também, a única onde se realiza, em contínuo, um controlo rigoroso das operações de tratamento.

Por estes motivos, esta estação dispõe de condições que permitem garantir regimes de funcionamento bastante estáveis ao longo do tempo.

Outros factores considerados importantes na escolha desta estação de tratamento, relacionam-se com o facto de esta *ETAR* ser a única existente na região do *Porto* que efectua o espessamento das lamas brutas antes de as enviar para o processo de digestão e, além disso, o processo de digestão existente ser do tipo anaeróbio aquecido com agitação, semelhante ao que se procurou simular em laboratório.

Outro aspecto igualmente importante prende-se com o facto de, ao contrário de outros estudos efectuados sobre o transporte de lamas em condutas, não ter sido objectivo desta Dissertação, diversificar os locais de colheita das lamas nem se procurou analisar o comportamento das lamas para gamas muito largas de concentração em sólidos.

Com efeito, nos estudos antecedentes deu-se sempre uma grande relevância à análise do comportamento das lamas para um grande número de situações diferentes, tanto em termos de proveniência como de concentração em sólidos existente.

Inferese desses estudos que o principal objectivo da análise realizada consistiu na observação das repercussões que a diversificação do local de colheita das lamas e das concentrações em sólidos têm no valor dos parâmetros reológicos e nas perdas de carga existentes no transporte das lamas.

Embora os aspectos referidos sejam importantes para a compreensão do fenómeno do hidrotransporte de sólidos em condutas, aplicado ao caso específico das lamas de esgoto, considera-se que, na prática, estes factores têm uma importância relativa bastante mais limitada do que a que se pode ser levado a supor após a leitura desses trabalhos.

Com efeito, em primeiro lugar, as características físicas químicas e biológicas das lamas provenientes das estações de tratamento de águas residuais urbanas são, em termos médios, parecidas, não existindo diferenças significativas entre si. As principais diferenças que podem ser encontradas nas características das lamas prendem-se mais com os tipos de operações que se executam no interior das estações de tratamento.

No presente estudo adoptou-se, então, uma metodologia diferente, utilizando as lamas com as concentrações normais existentes na estação de tratamento mas analisando a influência que as operações destinadas ao seu tratamento têm na alteração das suas condições de escoamento nas condutas.

A estrutura da presente Dissertação compreende, para além do presente capítulo, o Capítulo 2 onde se efectua uma análise aos estudos antecedentes realizados neste domínio, seguindo-se 3 capítulos dedicados à análise teórica dos três aspectos fundamentais envolvidos no estudo do escoamento das lamas:

- O Capítulo 3, intitulado "*Origem, Tratamento e Destino Final das Lamas*", analisa os aspectos associados à engenharia sanitária e ambiental que compreendem a caracterização física, química e biológica das lamas e os conceitos principais associados à sua origem, tratamento e destino final numa ETAR. A aplicação destes conceitos na presente Dissertação assumiu uma importância relevante na concepção e operação do digester anaeróbio aquecido utilizado nos estudos experimentais.
- O Capítulo 4, onde são apresentados os aspectos associados à reologia das lamas com particular incidência na análise da reologia de suspensões e nas técnicas existentes para medição das características reológicas.
- O Capítulo 5, onde se apresentam os aspectos teóricos mais significativos do estudo do escoamento das lamas nos regimes laminar, de transição e turbulento, nomeadamente, as leis do movimento, as fórmulas de resistência e os perfis de velocidade.

Após a descrição dos aspectos teóricos, efectua-se, nos dois capítulos seguintes (o 6º e o 7º), a apresentação dos trabalhos experimentais que fundamentaram a apresentação da presente Dissertação. Assim, no Capítulo 6 realiza-se a descrição das instalações construídas e dos equipamentos utilizados, enquanto que no Capítulo 7 é efectuada a apresentação e análise dos resultados obtidos.

Por último, no Capítulo 8 apresentam-se as conclusões extraídas da investigação efectuada e apontam-se, ainda, possíveis temas com interesse para investigação futura nesta área.

Atendendo ao elevado número de resultados obtidos e para facilitar a leitura da Dissertação, optou-se por apresentar os resultados obtidos nos estudos experimentais realizados em anexos. Assim, no Anexo A apresentam-se os resultados obtidos nos estudos hidrodinâmicos, e nos Anexos B e C, os resultados obtidos, respectivamente, nos estudos reológicos e granulométricos.

2. ESTUDOS ANTECEDENTES

Referem-se no presente Capítulo os estudos antecedentes realizados no domínio do transporte sob pressão das lamas produzidas nas ETAR's. Outras publicações existentes sobre assuntos relacionados com as lamas resultantes do tratamento efectuado numa ETAR, mas sem abordarem especificamente o seu transporte em condutas sob pressão, serão apresentadas ao longo da presente Dissertação.

Embora existam mais de 50 artigos publicados sobre o estudo das características reológicas das lamas tendo em vista o seu transporte em condutas sob pressão, os estudos mais generalizados até agora efectuados na área do transporte de lamas em tal tipo de condutas são os publicados pelo *Water Research Centre* em colaboração com a *British Hydromechanics Research Association*, que culminaram com a apresentação dos seguintes quatro artigos, *Johnson* [39], *Frost* [26], *Frost* [27] e *Heywood et al* [33]. Além destes artigos, referem-se, ainda, os trabalhos apresentados por *Mulbarger et al* [55] e *Monteiro* [52].

Nos trabalhos desenvolvidos pelo *Water Research Centre*, foram realizados estudos viscométricos e de determinação de perdas de carga no escoamento de uma grande quantidade de diferentes tipos de lamas provenientes de várias estações de tratamento e com concentrações em sólidos muito variadas. Procurando sintetizar as características das lamas estudadas, poderá referir-se que foram englobadas nos estudos lamas primárias, activadas e digeridas com concentrações em sólidos situadas, respectivamente, entre 2,8 e 6,2%, 1,3 e 4,5% e, por último, 3,8 e 8,6%.

Os testes viscométricos foram realizados utilizando os equipamentos disponíveis na época, que permitiam a medição das características reológicas numa gama bastante reduzida de velocidades de deformação angular. Utilizou-se, assim, principalmente, um reómetro do tipo tubo viscométrico mas, também, nas últimas experiências, reómetros rotacionais, embora com potencialidades bastante limitadas quando comparadas com os equipamentos actualmente existentes.

A determinação das perdas de carga foi efectuada numa conduta com 104 mm de diâmetro, tendo-se atingido regimes de escoamento que variaram entre o turbulento, para as mais baixas concentrações em sólidos e o laminar, para as concentrações em sólidos mais elevadas.

Nos estudos apresentados não é indicada a metodologia que permitiu atingir gamas de concentrações desta grandeza nas lamas estudadas. No entanto, considerando a evolução apresentada nos resultados, é muito provável que as lamas tenham sido transportadas para o local onde se realizaram os ensaios com a concentração em sólidos mais elevada e, posteriormente, ao longo dos ensaios, tenha sido efectuada uma progressiva diluição da lama com água. Admitindo esta hipótese, considera-se que esta metodologia pode ter alterado substancialmente os resultados obtidos.

Com efeito, só é possível atingir no início dos testes as concentrações em sólidos indicadas recorrendo a processos de espessamento das lamas por centrifugação. No entanto, este processo de espessamento pode ter alterado significativamente as características das lamas, em particular as primárias e as activadas, pois as acções mecânicas exercidas durante a centrifugação permitem a separação de uma parte significativa da água

aderente às partículas sólidas ("*bound water*"). Por sua vez, a posterior adição de água durante os ensaios não repõe as características existentes inicialmente.

Além disso, verifica-se, também, que as lamas primárias e activadas foram analisadas durante períodos de tempo bastante longos. Este facto poderá, também, ter contribuído para a ocorrência de grandes distorções nos resultados obtidos, uma vez que estes fluidos apresentam características que variam muito rapidamente no tempo, devido ao processo biológico de estabilização da matéria orgânica existente. Considera-se, assim, que apenas poderão ser consideradas primárias ou activadas as lamas deste tipo cujo estudo tenha sido efectuado nas horas seguintes à sua colheita na estação de tratamento.

Por último, verifica-se que as electro-bombas utilizadas nos ensaios não foram as mais adequadas para realizar a elevação de lamas. Efectivamente, os ensaios hidrodinâmicos foram efectuados com electro-bombas centrífugas que apresentaram bastantes problemas de funcionamento devido à ocorrência de entupimentos e à existência de biogás, principalmente na elevação das lamas primárias com maiores concentrações em sólidos.

Com base nos estudos efectuados pelo *Water Research Centre*, foi proposto o modelo reológico de *Herschell-Bulkley* como aquele que melhor representa o comportamento reológico da lama, tendo sido apresentada uma metodologia para quantificação dos parâmetros reológicos em função da concentração em sólidos totais existente na lama.

Apresenta-se no *quadro 1* um resumo das características preconizadas pelo *Water Research Centre* para determinação dos parâmetros reológicos das lamas.

Lama	Parâmetro	Limite Superior	Valor Médio	Limite Inferior
Primária e Activada	τ_c	$0,00014 \times SS^{2,90}$	$0,000083 \times SS^{2,90}$	$0,000049 \times SS^{2,90}$
	K	$0,000064 \times SS^{3,00}$	$0,000019 \times SS^{3,00}$	$0,0000056 \times SS^{3,00}$
	n	$0,78 \times SS^{-0,184}$	$0,81 \times SS^{-0,184}$	$0,84 \times SS^{-0,184}$
Activada	τ_c	—	$0,00013 \times SS^{3,0}$	—
	K	—	$0,00011 \times SS^{3,0}$	—
	n	—	$1,7 \times SS^{-0,45}$	—
Digerida	τ_c	$0,000014 \times SS^{3,37}$	$0,0000085 \times SS^{3,37}$	$0,0000051 \times SS^{3,37}$
	K	$0,0000060 \times SS^{3,50}$	$0,0000017 \times SS^{3,50}$	$0,00000054 \times SS^{3,50}$
	n	$0,90 \times SS^{-0,214}$	$0,93 \times SS^{-0,214}$	$0,97 \times SS^{-0,214}$

NOTA: valores de SS em kg/m³

quadro 1 – Resumo das características preconizadas pelo Water Research Centre para determinação dos parâmetros reológicos das lamas (adaptado de Frost [27]).

Refira-se, ainda, que, atendendo à forma como a concentração em sólidos foi determinada, a designação mais adequada para a concentração em sólidos não é a indicada nos artigos (sólidos em suspensão), mas a de ST (sólidos totais). Com efeito, afigura-se bastante difícil, ou mesmo impossível, a determinação dos sólidos em suspensão em lamas com as concentrações em sólidos indicadas.

Por último, importa salientar que a reduzida gama de valores para a velocidade de deformação angular atingida nos ensaios reológicos, pode estar na origem de grandes distorções na previsão dos resultados obtidos. *Brown et al* [12] analisaram os erros que podem ser cometidos por extrapolação dos resultados experimentais. Apresenta-se, na *figura 1*, as consequências que a aplicação de metodologias distintas pode ter na estimativa do comportamento reológico das lamas.

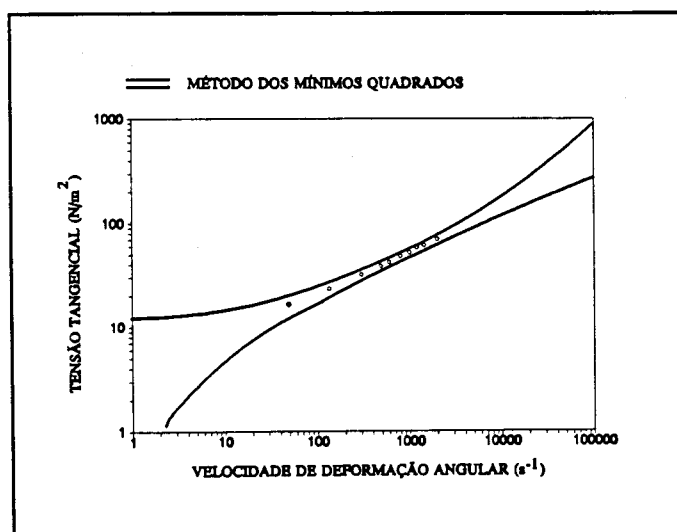


figura 1 – Intervalos de confiança (90%) para o comportamento reológico de uma lama digerida com uma concentração em sólidos de 8% (adaptado de Brown et al [12]).

Por sua vez, *Mulbarger et al* [55] realizaram, também, estudos sobre o transporte de lamas em condutas sob pressão, de lamas primárias, activadas e digeridas, tendo concluído, igualmente, que existe uma grande dispersão nos valores obtidos para os parâmetros reológicos que caracterizam as lamas.

Com base em estudos experimentais efectuados, estes autores apresentaram uma metodologia para quantificação das perdas de carga no escoamento destas lamas, que consiste em admitir que o seu comportamento reológico é do tipo plástico de *Bingham*.

Embora os resultados obtidos demonstrem que, em geral, as lamas digeridas apresentam valores para a tensão de cedência e para o coeficiente de rigidez bastante inferiores aos das lamas primárias, estes autores optaram por considerar a sua caracterização conjunta, tendo proposto uma gama de valores prováveis para estes dois parâmetros reológicos em função da concentração em sólidos existente na lama. Esta metodologia justifica-se porque os valores obtidos nos estudos realizados apresentam uma grande dispersão que dificulta bastante a formulação de um modelo.

Apresentam-se, nas *figuras 2 e 3*, respectivamente para a tensão de cedência e para o coeficiente de rigidez, os valores máximos e mínimos (em unidades do sistema internacional) propostos para as lamas nos estudos de *Mulbarger et al [55]*.

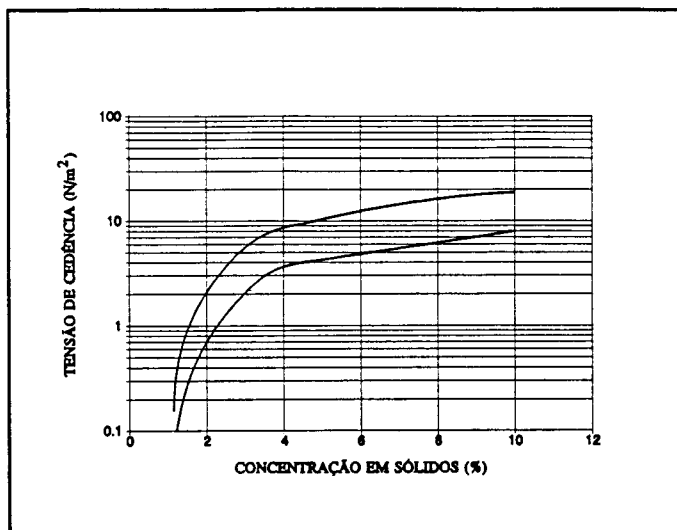


figura 2 – Tensão de cedência das lamas produzidas nas ETAR's (adaptado de Mulbarger et al [55]).

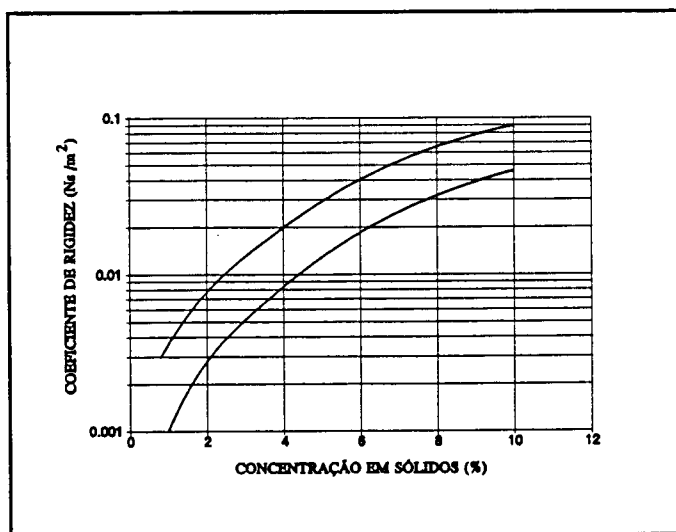


figura 3 – Coeficiente de rigidez das lamas produzidas nas ETAR's (adaptado de Mulbarger et al [55]).

Por último, *Monteiro [52]* realizou uma série de experiências para determinação de perdas de carga nos escoamentos sob pressão de lamas primárias, activadas e digeridas. Estes estudos foram realizados na *ETAR de Cambados* e constituíram uma fase inicial do trabalho de investigação que resultou na apresentação da presente Dissertação.

Nesses estudos foi, apenas, possível quantificar a concentração em sólidos e as perdas de carga no escoamento das lamas tendo-se concluído que os comportamentos reológicos que melhor traduzem os

resultados obtidos nos estudos hidrodinâmicos são os de *Herschell-Bulkley* e lei de potência, embora se tenham, também, obtido, para as concentrações em sólidos mais baixas, resultados muito próximos de um comportamento reológico do tipo *Newtoniano*.

Em relação a estes estudos importa referir, em primeiro lugar, que as concentrações em sólidos das lamas analisadas, em particular as activadas e as primárias são extremamente baixas, variando, respectivamente, entre 0,26 a 0,55% e 0,3 a 0,48%. Por este motivo, os resultados obtidos para estas lamas aproximam-se bastante de um comportamento reológico do tipo *Newtoniano*. Por sua vez, apenas as concentrações exibidas pelas lamas digeridas se aproximaram dos valores considerados normais, tendo variado entre 2,0 e 3,1%.

Refira-se, subsidiariamente, que a inexistência de estudos reológicos, os problemas verificados nas tomadas de pressão devido à ocorrência de entupimentos motivados pelo pequeno diâmetro dos orifícios (3,0 mm) e a inexistência de um sistema eficaz para a purga do biogás libertado pelas tomadas de pressão, dificultaram bastante a realização desse trabalho.

3. ORIGEM, TRATAMENTO E DESTINO FINAL DAS LAMAS

As águas residuais produzidas em aglomerados populacionais, correntemente designadas por águas residuais urbanas, são drenadas para as estações de tratamento onde recebem vários tratamentos específicos, de natureza física e biológica, destinados a remover as cargas poluentes de natureza orgânica e inorgânica que transportam e que, se fossem descarregadas directamente num meio receptor hídrico, provocariam danos ambientais consideráveis ao nível dos ecossistemas aí existentes e impediriam, também, a utilização deste recurso numa determinada extensão a jusante do local da descarga.

As cargas poluentes existentes nas águas residuais, em particular nas urbanas, estão relacionadas com a presença de partículas sólidas que se podem apresentar em suspensão ou como matéria dissolvida. Estes sólidos têm diferentes origens, formas, dimensões e características e representam, normalmente, cerca de 0,05 a 0,1% do volume total do esgoto.

Numa primeira análise, o objectivo primordial de um sistema de tratamento de águas residuais consiste em reter essas partículas sólidas com a máxima eficiência e menores custos tanto de primeiro investimento como de exploração.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS SÓLIDOS EXISTENTES NAS ÁGUAS RESIDUAIS

3.1.1. Características Físicas

As partículas sólidas existentes numa água residual podem ser caracterizadas de formas diferentes em função do estudo a realizar. Para o estudo do escoamento das lamas em condutas, as características físicas mais importantes dos sólidos a considerar são:

- concentração;
- densidade;
- granulometria.

3.1.1.1. Concentração

A determinação efectuada com maior frequência nas partículas sólidas existentes nas águas residuais, consiste na quantificação da concentração da matéria orgânica e inorgânica existente.

Com efeito, o conhecimento das componentes orgânicas e inorgânicas de um efluente é fundamental para a selecção do método de tratamento mais adequado e, consequentemente, para a definição dos órgãos que serão utilizados no processo de tratamento.

Numa água residual a quantificação dos sólidos orgânicos e inorgânicos passa pela determinação dos sólidos totais e voláteis seguindo a metodologia descrita em seguida.

A quantificação dos sólidos totais e voláteis presentes numa água residual compreende duas fases. Na primeira, um determinado volume de amostra é colocado numa estufa até se evaporar totalmente a água existente, separando-a, assim, dos sólidos. Obtém-se, deste modo, o valor dos sólidos totais (ST) existentes na água residual.

Posteriormente, a mesma amostra é colocada numa mufla à temperatura de 550°C. A esta temperatura todos os sólidos de natureza orgânica são volatilizados e a posterior pesagem da mesma amostra indica, apenas, o peso dos sólidos inorgânicos (SI) presentes podendo-se, ainda, obter, por diferença com os sólidos totais, a quantidade de sólidos voláteis (SV) existentes na água residual.

Outra caracterização dos sólidos presentes nas águas residuais frequentemente utilizada faz-se a partir da quantificação da concentração da sua componente em suspensão.

A metodologia seguida nesta análise passa pela filtração de um determinado volume de amostra num filtro com um diâmetro dos poros de cerca de 1,0 μm e peso conhecido. Após secagem em estufa, a pesagem do filtro com os sólidos retidos permite determinar o peso dos sólidos em suspensão (SS) presentes na água residual, enquanto que a evaporação do filtrado em estufa, seguida da pesagem dos resíduos, revela a quantidade dos sólidos filtrados existentes na água residual.

Em relação aos sólidos em suspensão é, ainda, frequente estabelecer uma subdivisão entre os sólidos sedimentáveis e os não sedimentáveis.

Consideram-se sedimentáveis os sólidos que se encontram, apenas, em suspensão no meio líquido devido ao movimento e agitação a que o fluido está sujeito durante o seu escoamento, mas que sedimentam rapidamente quando o fluido está em repouso. A determinação destes sólidos numa água residual efectua-se com auxílio de um *cone Imhoff*, medindo-se o volume de sólidos que se acumulam durante um determinado período de tempo na zona inferior do cone, separando-se da fase líquida onde se encontravam apenas por acção do seu peso próprio.

Nem todos os sólidos referidos na apresentação anteriormente efectuada são resultantes da contaminação associada à utilização da água. Com efeito, a água potável abastecida nas redes públicas municipais contém concentrações apreciáveis de sólidos dissolvidos, em particular sais minerais que, quando abaixo de determinados limites estabelecidos por lei, não representam qualquer risco para a saúde dos consumidores. A remoção deste tipo de sólidos não constitui, obviamente, um objectivo a atingir no tratamento das águas residuais apesar de serem, também, quantificados em determinadas análises, nomeadamente, na determinação dos sólidos totais e dos sólidos filtrados.

Concluindo, pode admitir-se que existe numa água residual típica de um aglomerado populacional uma concentração média de cerca de 500 a 700 mg/ℓ de sólidos resultantes da sua utilização e que constituem, por isso, cargas poluentes que importa retirar para restituir à água as suas características primitivas.

Destes 500 a 700 mg/ℓ de sólidos, cerca de 300 a 400 mg/ℓ são sólidos suspensos, enquanto que os restantes 200 a 300 mg/ℓ estão na forma coloidal ou dissolvida. O valor dos sólidos suspensos poderá, ainda,

subdividir-se em duas parcelas referentes aos sólidos sedimentáveis e aos não sedimentáveis, que representam neste tipo de águas residuais cerca de 2/3 e 1/3 do valor total indicado para os sólidos em suspensão.

3.1.1.2. Densidade

A densidade dos sólidos existentes numa água residual é uma propriedade determinante na caracterização das suas características de sedimentabilidade. Com efeito, as partículas sólidas de natureza orgânica apresentam uma densidade ligeiramente superior à unidade e as inorgânicas, constituídas por matéria mineral, têm, por sua vez, uma densidade aproximada de 2,65.

A densidade média da matéria sólida existente numa água residual, constituída por sólidos fixos (matéria mineral) e sólidos voláteis (matéria orgânica), pode ser obtida do seguinte modo:

$$\frac{M_s}{d_s \rho_{H_2O}} = \frac{M_{sf}}{d_{sf} \rho_{H_2O}} + \frac{M_{sv}}{d_{sv} \rho_{H_2O}} \quad (1)$$

Sendo a percentagem média de sólidos orgânicos de cerca de 80%, verifica-se que a densidade média das partículas sólidas presentes numa água residual será de cerca de 1,15.

As águas residuais podem ser, assim, consideradas como suspensões de partículas com reduzidas características de sedimentabilidade.

Por este motivo, esta tendência só se manifesta em órgãos onde se criam condições favoráveis à sedimentação das partículas sólidas, nomeadamente, velocidades de escoamento extremamente reduzidas que conduzem a uma grande tranquilização da massa líquida.

3.1.1.3. Granulometria

Os sólidos existentes numa água residual podem ser agrupados em quatro grupos em função da sua granulometria:

- | | |
|---------------------------|---|
| – Sólidos sedimentáveis | $\phi \geq 100 \mu\text{m};$ |
| – Sólidos supra-coloidais | $100 \mu\text{m} > \phi \geq 1,0 \mu\text{m};$ |
| – Sólidos coloidais | $1,0 \mu\text{m} > \phi \geq 0,01 \mu\text{m};$ |
| – Sólidos dissolvidos | $\phi < 0,01 \mu\text{m}.$ |

Cada um destes grupos apresenta características específicas que condicionam o seu comportamento e, em particular, a metodologia mais apropriada para efectuar a sua remoção da fracção líquida.

Deste modo, a formulação apresentada, adaptada da proposta por *Levine et al* [47], é particularmente apropriada para a caracterização dos critérios correntemente utilizados para dimensionamento dos órgãos de tratamento existentes nas estações de tratamento de águas residuais.

Assim, consideram-se sedimentáveis os sólidos que são rapidamente removidos recorrendo a um processo de decantação gravítica simples. Trata-se de sólidos de grandes dimensões ($\phi > 100 \mu\text{m}$), constituídos, em geral, por detritos de natureza orgânica, flocos bacterianos e materiais inorgânicos como areias.

Os sólidos supra-coloidais, localizam-se, ainda, na classe dos sólidos em suspensão sedimentáveis mas, apresentam baixas velocidades de decantação que limitam, em geral, a sua sedimentação nos órgãos específicos de tratamento, embora uma percentagem significativa seja interceptada e arrastada pelas partículas sólidas de maiores dimensões na sua trajectória de decantação.

Estas substâncias não podem, contudo, ser consideradas coloidais porque, ao contrário destas, não se encontram ligadas ao meio fluido adjacente por forças superficiais de natureza eléctrica. São exemplos deste tipo de substâncias, para além das já referidas anteriormente para os sólidos sedimentáveis mas, agora, com menores dimensões, as bactérias, protozoários e siltes.

Os sólidos coloidais, ou colóides, são partículas sólidas de muito pequena dimensão ($0,01 \mu\text{m}$ a $1,0 \mu\text{m}$) que não sedimentam nem podem ser removidas da fase líquida, onde se encontram, utilizando processos físicos de tratamento.

Estes sólidos possuem cargas eléctricas superficiais capazes de gerar forças que impedem a sua aglomeração e sedimentação. Os colóides existentes numa água residual podem ser do tipo hidrofóbico ou hidrofílico em função da sua afinidade em relação à fracção líquida envolvente.

As partículas coloidais de natureza orgânica são, normalmente, hidrofílicas e têm, por isso, uma grande afinidade com a água, como é o caso, por exemplo, das proteínas. Os colóides inorgânicos (por exemplo as argilas) são, em geral, hidrofóbicos. Para além das proteínas e argilas, os polisacarídios, o ácido desoxirribonucleico (ADN), fragmentos celulares e os vírus são outros exemplos de sólidos coloidais.

Por último, consideram-se sólidos dissolvidos os sais minerais e as macromoléculas orgânicas existentes nas águas residuais com números atómicos situados entre 10^3 e 10^5 .

Estas macromoléculas são muito rapidamente biodegradáveis e são, por isso, as primeiras a ser removidas nas estações de tratamento em órgãos de tratamento biológico pelos microrganismos existentes. Incluem-se neste tipo de substâncias os hidratos de carbono, os nutrientes (azoto e fósforo), aminoácidos, vitaminas, ácidos gordos, enzimas, clorofila, ácidos fúlvicos e húmicos, compostos orgânicos tóxicos, etc.

Apresenta-se, na *figura 4*, uma caracterização granulométrica dos principais compostos presentes numa água residual, dando maior incidência às substâncias com dimensões inferiores a $0,1 \text{ mm}$ e à matéria orgânica. Com efeito, os sólidos orgânicos com dimensões superiores a $0,1 \text{ mm}$ são, normalmente, detritos resultantes da aglomeração das substâncias elementares anteriormente referidas.

Por sua vez, nas águas residuais, a caracterização dos sólidos orgânicos é particularmente importante porque cerca de 80% dos sólidos existentes são deste tipo.

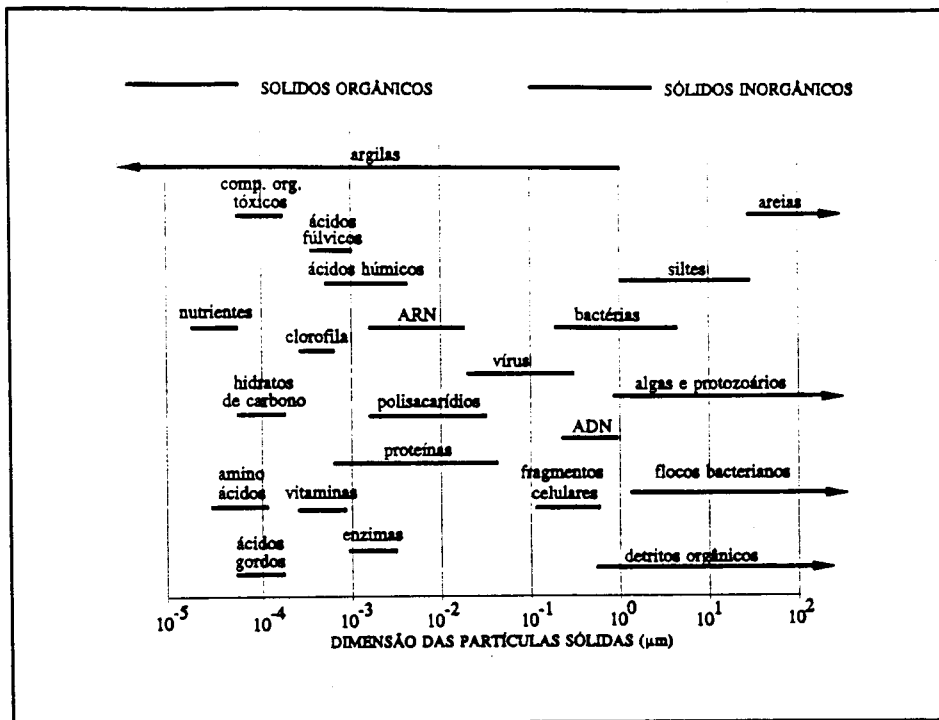


figura 4 – Caracterização granulométrica das partículas sólidas presentes numa água residual (adaptado de Levine et al [47]).

3.1.2. Características Químicas

A análise das características químicas das partículas sólidas existentes numa água residual deve ser dividida em função da sua natureza orgânica ou inorgânica.

3.1.2.1. Sólidos Orgânicos

A maior parte dos sólidos existentes nas águas residuais urbanas caracterizam-se por serem de natureza orgânica. Este tipo de substâncias é maioritariamente constituída por hidratos de carbono, proteínas, gorduras e, também, em pequenas concentrações, por ureia.

Quimicamente, os compostos orgânicos podem ser considerados como combinações mais ou menos complexas de átomos de carbono, hidrogénio, oxigénio, azoto e, em menor percentagem, de enxofre, fósforo e ferro.

Os hidratos de carbono são compostos de carbono, hidrogénio e oxigénio dissolvidos na água, com boas características de biodegradabilidade e que são, por isso, rapidamente assimilados pelos microrganismos presentes na água, desde que estejam criadas as condições necessárias para a sua actividade.

Por sua vez, as proteínas são compostos bastante complexos, com pesos moleculares elevados, de carbono, hidrogénio, oxigénio e azoto, e, em alguns casos, enxofre, fósforo e ferro.

As gorduras são, também, compostos de carbono, hidrogénio e oxigénio, embora se distingam dos hidratos de carbono por apresentarem uma estrutura muito mais estável, isto é, a sua decomposição biológica é muito mais lenta.

Por último, a ureia é, em conjunto com as proteínas, a origem mais importante do azoto presente nas águas residuais, mas é muito rapidamente decomposta em substâncias mais estáveis pelo que raramente existe em quantidades apreciáveis nas estações de tratamento.

Numa água residual poderão existir, ainda, quantidades vestigiais de outros compostos orgânicos muitos deles extremamente tóxicos e perigosos, nomeadamente compostos halogenados, pesticidas, herbicidas e insecticidas.

A matéria orgânica existente numa água residual é, em geral, passível de ser decomposta biologicamente pelo elevado número de microrganismos presente que se alimentam destes compostos, metabolizando-os e transformando-os em tecido celular. Este tipo de acção pode ser efectuada tanto na presença como na ausência de oxigénio, pois existem nas águas residuais colónias de microrganismos aeróbios e anaeróbios que se desenvolvem mais, ou menos, em função das condições prevalecentes no meio, em particular da presença ou ausência de oxigénio e, também, da temperatura.

A quantificação da matéria orgânica presente numa água residual realiza-se, em geral, indirectamente, com recurso à medição da *Carência Química de Oxigénio (CQO)*. Este parâmetro indica a quantidade de oxigénio que é necessária para oxidar quimicamente toda a matéria orgânica existente na água residual.

Em laboratório, essa oxidação é feita, normalmente, com auxílio de um oxidante químico poderoso, o dicromato de potássio.

Por sua vez, na determinação da matéria orgânica biodegradável recorre-se, frequentemente, ao teste da *Carência Bioquímica de Oxigénio (CBO)*. Este teste, denominado por **CBO**, quando decorre durante um período de 5 dias, permite quantificar o oxigénio consumido pelos microrganismos na oxidação biológica da matéria orgânica, considerando-se esse valor proporcional à quantidade de matéria orgânica existente.

3.1.2.2. Sólidos Inorgânicos

Os sólidos inorgânicos presentes nas águas residuais, para além dos de origem mineral resultantes da dissolução natural de sais minerais na água, das areias, siltes e argilas englobam, ainda, os nutrientes, sulfatos e compostos inorgânicos tóxicos.

Os compostos de azoto e fósforo denominam-se, vulgarmente, nutrientes por constituírem a principal fonte de alimento de algas e restantes plantas. Os nutrientes azotados assimilados pelas plantas são os compostos resultantes da biodegradação do azoto orgânico e do azoto amoniacal existente nas águas residuais e compreendem os nitritos e os nitratos.

Os compostos de fósforo presentes nas águas residuais apresentam-se, em geral, na forma de ortofosfatos que, quando em pequenas concentrações, são assimilados pelos microrganismos na síntese da matéria orgânica mas, quando em excesso, contribuem para o desenvolvimento exagerado de algas nos meios receptores estando, por isso, em conjunto com os nitratos e os nitritos, na origem de processos de eutrofização.

Nas águas residuais, o enxofre aparece frequentemente na forma de sulfatos que podem ser removidos biologicamente. Este processo conduz, no entanto, à formação de sulfureto de hidrogénio (H_2S), que é um gás tóxico para os seres vivos e corrosivo para as condutas e meio ambiente, em geral.

Os compostos inorgânicos tóxicos são constituídos por substâncias que, pela sua natureza, podem destruir os seres vivos existentes nas águas residuais ou nos processos de tratamento do tipo biológico. Por serem os mais usuais, referem-se os metais pesados embora, em circunstâncias normais, nunca ultrapassem concentrações bastante inferiores às consideradas potencialmente perigosas para a sobrevivência dos microrganismos existentes na água residual.

3.1.3. Características Biológicas

As águas residuais transportam enormes quantidades de seres vivos microscópicos. Alguns destes microrganismos encontram nas águas residuais o meio ambiente mais apropriado para se desenvolverem, enquanto que, para outros, esse meio é hostil e desadequado à sua sobrevivência.

Os microrganismos que encontram nas águas residuais condições adequadas ao seu desenvolvimento, são os que se alimentam da matéria orgânica ou de seres vivos existentes. Estes microrganismos são, assim, indispensáveis à preservação do equilíbrio ambiental, pois eliminam as cargas poluentes de natureza orgânica rejeitadas nas águas residuais.

Por sua vez, os microrganismos patogénicos têm como meio ambiente mais favorável ao seu desenvolvimento o organismo humano mas, embora em número progressivamente mais reduzido devido à elevada taxa de mortalidade, sobrevivem durante largos períodos nas águas residuais constituindo, assim, uma permanente ameaça para a saúde pública.

Independentemente da divisão anteriormente efectuada, existem nas águas residuais seres vivos das três classes em que normalmente se dividem os organismos vivos:

- as bactérias;
- os vegetais;
- os animais.

Esta classificação separa as bactérias dos animais e do vegetais porque estes microrganismos elementares possuem características tanto de um como de outro.

As bactérias são seres vivos microscópicos, unicelulares, que tanto podem viver isoladas como em colónias. São constituídas, em grande parte, por água (cerca de 80%) sendo os restantes 20% sólidos maioritariamente de origem orgânica (cerca de 90%).

Apresenta-se, na *figura 5*, a estrutura celular típica das bactérias, constituída por uma zona interna, denominada citoplasma, formada por hidratos de carbono, proteínas e onde existe, também, o ácido ribonucleico (ARN) responsável pela síntese das proteínas. Dentro do citoplasma, existe, ainda, uma zona bem definida, designada por núcleo, onde se localiza o ácido desoxirribonucleico (ADN) que armazena toda a informação necessária à reprodução celular efectuada, normalmente, por fissão binária.

Para conseguir assimilar a matéria orgânica existente no meio envolvente, as bactérias segregam enzimas que vão funcionar como biocatalizadores das reacções químicas necessárias para transformar substâncias complexas em compostos mais elementares. Posteriormente, estes compostos são absorvidos pela bactéria através da membrana que separa a sua zona interior do meio líquido envolvente.

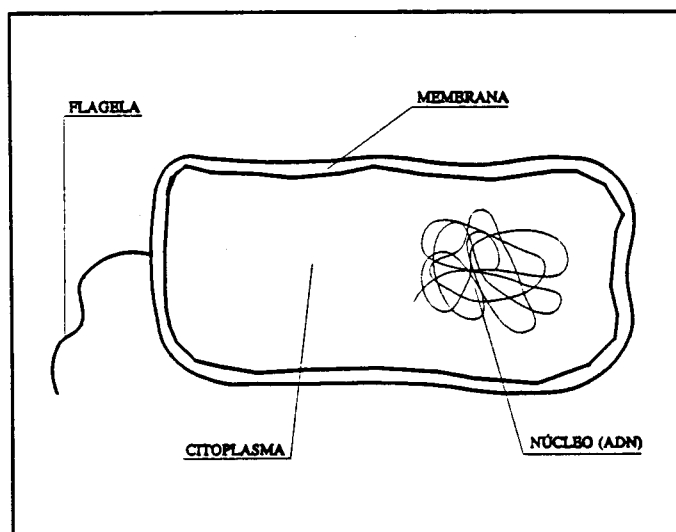


figura 5 – Estrutura celular típica das bactérias (adaptado de Metcalf & Eddy [51]).

As bactérias são seres vivos extremamente sensíveis à temperatura e ao pH do meio líquido onde se encontram. Devido à importância que os processos biológicos de tratamento assumem em qualquer estação de tratamento, estabelece-se, em seguida, uma classificação para as bactérias em função da gama de temperaturas considerada mais apropriada para o seu desenvolvimento:

- bactérias psicrófilas, (12 – 18 °C);
- bactérias mesófilas, (25 – 40 °C);
- bactérias termófilas, (55 – 65 °C).

O pH é, também, um factor determinante no desenvolvimento bacteriano pois estes seres vivos encontram as condições ideais para a sua sobrevivência em fluidos com valores do pH situados entre 6,0 e 8,0 e, por outro lado, não sobrevivem quando os valores do pH são inferiores a 4,0 ou superiores a 9,5.

A classe dos vegetais é, por sua vez, constituída pelos seres vivos multicelulares complexos que se alimentam dos nutrientes existentes na água residual metabolizando-os e transformando-os em tecido celular. São constituídos por fungos e algas.

Os fungos distinguem-se das algas por captarem a energia que necessitam para o seu metabolismo das reacções químicas existentes no meio envolvente. São, assim, designados por seres quimiotróficos. Em oposição, as algas designam-se por seres fototróficos porque vão buscar a energia que necessitam para o seu metabolismo directamente à luz solar.

Por último, a classe dos animais existente nas águas residuais é constituída pelos microrganismos que se alimentam dos outros seres vivos existentes no meio fluido. A classificação normalmente efectuada para este tipo de organismos considera, apenas, duas espécies, os protozoários e os rotíferos.

Os protozoários são os seres vivos mais elementares existentes no reino animal, são do tipo unicelular embora apresentem uma organização celular bastante complexa. Estes organismos têm uma enorme importância no tratamento biológico das águas residuais porque, sendo predadores das bactérias, evitam o seu desenvolvimento exagerado, mantendo um equilíbrio entre as colónias de microrganismos existentes.

Os rotíferos são seres vivos multicelulares, normalmente parasitas rejeitados pelo organismo de indivíduos e animais infectados.

Por último, refere-se que na classificação anteriormente efectuada para os organismos vivos excluíram-se os vírus. Com efeito, estes seres não apresentam as características de vida celular típica dos seres vivos propriamente ditos. Localizam-se, por isso, na fronteira entre a matéria viva e a matéria inerte.

3.2. COMPOSIÇÃO DAS ÁGUAS RESIDUAIS

Com base na caracterização efectuada em 3.1. para as partículas sólidas existentes numa água residual é, agora, possível efectuar uma caracterização completa das águas residuais em termos dos parâmetros físicos, químicos e biológicos com maior interesse na concepção das estações de tratamento de águas residuais.

No *quadro 2* apresenta-se a composição típica de uma água residual doméstica afluente a uma estação de tratamento.

Em termos de caracterização bacteriológica optou-se por apresentar, apenas, a sua concentração em coliformes fecais e totais. Efectivamente estes microrganismos são universalmente considerados como indicadores do nível de poluição bacteriológica existente numa água residual e são, por isso, os organismos patogénicos analisados com maior frequência.

PARÂMETROS	DESIGNAÇÃO	VALOR MÉDIO
FÍSICOS	Sólidos em Suspensão	mg/l 400
	fixos	mg/l 100
	voláteis	mg/l 300
	Sólidos Dissolvidos	mg/l 500
	fixos	mg/l 300
	voláteis	mg/l 200
	Sólidos Sedimentáveis	mg/l 250
QUÍMICOS	CBO ₅ (a 20°C)	mg/l 400
	CQO	mg/l 600
	NTK	mg/l 70
	Nitritos	mg/l 0
	Nitratos	mg/l 0
	Fósforo Total	mg/l 10
	Óleos e Gorguras	mg/l 100
BACTERIOLÓGICOS	Coliformes Totais	nº/100 ml $10^7 - 10^8$
	Coliformes Fecais	nº/100 ml $10^6 - 10^7$

quadro 2 – Composição típica de uma água residual.

3.3. TRATAMENTO DAS ÁGUAS RESIDUAIS

As estações de tratamento de águas residuais são concebidas com o objectivo de remover as cargas poluentes existentes na forma de sólidos em suspensão ou dissolvidos nas águas residuais.

Sendo a grande maioria dos sólidos existentes nas águas residuais de natureza orgânica, os processos de tratamento, normalmente, utilizados são do tipo físico e biológico.

Os processos físicos recorrem à acção da gravidade, ou de equipamentos mecânicos, para remover as partículas sólidas em suspensão no meio líquido. Por sua vez, os processos biológicos utilizam microrganismos para converter as partículas sólidas orgânicas que se encontram na forma coloidal ou dissolvida em gases e tecido celular, libertando-se, os primeiros, para a atmosfera e removendo-se, os segundos, da fase líquida por decantação.

A aplicação destes processos em estações de tratamento devidamente construídas e cuidadosamente operadas, poderá conduzir a eficiências de remoção das cargas poluentes de natureza física e química, superiores a 95%.

Na *figura 6* apresenta-se um fluxograma típico das diversas etapas de tratamento existentes num' tipo de estação de tratamento muito utilizado no tratamento de águas residuais urbanas.

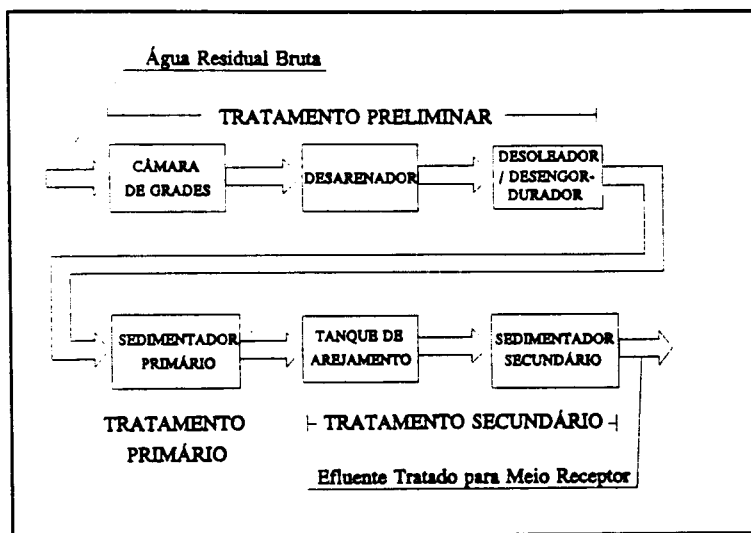


figura 6 – Fluxograma típico das diversas etapas de tratamento de águas residuais existentes numa ETAR convencional.

Os três primeiros órgãos de tratamento apresentados na *figura 6* realizam o chamado tratamento preliminar cujo objectivo principal é a remoção das matérias que possam danificar os órgãos e equipamentos existentes a jusante e, também, interferir com os processos de tratamento seguintes reduzindo a sua eficiência.

Normalmente, nas estações de tratamento, o tratamento preliminar consiste na remoção sequencial dos sólidos de grandes dimensões ($\phi > 10$ mm), das areias e das gorduras. Estas operações efectuem-se, respectivamente, na câmara de grades, nos desarenadores e nos desoleadores/desengorduradores, podendo, em alguns casos, prever-se um sistema que efectue a remoção, em simultâneo, no mesmo órgão de tratamento, das areias e dos óleos e gorduras.

Os resíduos retirados em cada um destes órgãos são, normalmente, sujeitos a uma preparação e acondicionamento específico e transportados, em seguida, para o seu destino final que é, habitualmente, um aterro sanitário.

O tratamento preliminar, não tem, assim, como objectivo principal a redução das cargas poluentes das águas residuais, medidas em termos de parâmetros como os sólidos em suspensão, CBO₅ e NTK mas, tão sómente, preparar as águas residuais para os processos de tratamento que se seguem.

O tratamento primário surge imediatamente a jusante do tratamento preliminar e consiste na remoção dos sólidos em suspensão sedimentáveis. Esta remoção é, normalmente, efectuada por sedimentação nos chamados sedimentadores primários. Estes órgãos são extremamente importantes em qualquer sistema de tratamento porque permitem separar, sem custos de exploração significativos, cerca de 2/3 dos sólidos em

suspensão e remover cerca de 1/3 da CBO₅ existente no efluente, por simples decantação gravítica das partículas sólidas.

Os sólidos decantados denominam-se *lamas primárias* e são constituídos, fundamentalmente, por uma suspensão de sólidos em água em concentrações que rondam, em geral, os 2 a 4%.

A terceira fase de tratamento e, geralmente a última, é o tratamento secundário. Este tratamento destina-se a retirar das águas residuais os sólidos orgânicos em suspensão ou dissolvidos que, devido à sua reduzida dimensão, não sedimentaram no sedimentador primário.

Recorre-se, assim, a um processo biológico de tratamento que se realiza em duas etapas.

Na primeira etapa a água residual é descarregada num órgão de tratamento (reactor biológico), onde existem concentrações muito elevadas de microrganismos. Este órgão está equipado com os dispositivos necessários para garantir as condições de agitação e arejamento necessárias para que o processo de assimilação biológica da matéria orgânica por esses microrganismos decorra de uma forma rápida e eficaz.

A segunda etapa do tratamento biológico consiste na decantação das partículas sólidas floculentas de natureza biológica saídas do reactor biológico. Essa decantação realiza-se no sedimentador secundário onde, após a separação gravítica das partículas sólidas do líquido clarificado, se obtém o efluente tratado.

Os sólidos biológicos decantados denominam-se *lamas biológicas* porque são constituídos por uma suspensão de sólidos floculentos de natureza biológica em água. As suas concentrações típicas situam-se, normalmente, entre 0,7 e 1,0%.

O efluente tratado saído do sedimentador secundário apresenta uma baixa concentração de cargas poluentes podendo ser, em princípio, rejeitado num meio receptor hídrico sem danificar o equilíbrio ambiental aí existente.

Contudo, em casos específicos, poderá haver necessidade de recorrer a métodos de tratamento mais sofisticados denominados, genericamente, tratamentos terciários, destinados a remover mais eficazmente determinadas cargas poluentes ou a eliminar os microrganismos patogénicos existentes.

Concluindo, nas estações de tratamento, a remoção das cargas poluentes transportadas pelas águas residuais resulta na produção de lamas primárias e biológicas, respectivamente, nos sedimentadores primários e secundários.

Atendendo à importância dos processos de decantação e de oxidação biológica da matéria orgânica na remoção das cargas poluentes das águas residuais e na própria constituição das lamas produzidas, apresenta-se, em seguida, uma descrição dos mecanismos físicos e biológicos envolvidos nestes processos.

3.3.1. Decantação de Partículas Sólidas

O conhecimento dos mecanismos associados à decantação das partículas sólidas num meio líquido constitui um elemento fundamental para o tratamento das águas residuais pois, como foi anteriormente referido, o principal processo adoptado nas estações de tratamento para separar a fase sólida da líquida é por sedimentação, respectivamente, nos sedimentadores primário e secundário. Há, no entanto, importantes diferenças entre os mecanismos envolvidos nestas duas etapas de tratamento.

Assim, enquanto no sedimentador primário a sedimentação das partículas acontece, predominantemente, de uma forma isolada e com uma velocidade sensivelmente constante, denominando-se por sedimentação discreta, no sedimentador secundário, por sua vez, promove-se a sedimentação de partículas biológicas floculentas resultantes da aglomeração natural ou forçada de materiais coloidais em suspensão. Neste caso, a sedimentação não pode ser considerada discreta pois, devido à grande aglomeração de partículas sólidas, ocorrem outros mecanismos de sedimentação. É o caso da sedimentação floculenta a que se segue, por ordem crescente de concentração em sólidos, a sedimentação forçada e, por último, em alguns casos, a sedimentação por compressão.

3.3.1.1. Sedimentação Discreta

O movimento descendente de uma partícula sólida num meio líquido, em repouso, por acção da gravidade, apresenta, no início, uma dada aceleração até ser atingida uma determinada velocidade designada por velocidade de sedimentação.

A velocidade de sedimentação é, assim, a velocidade com que se atinge o equilíbrio das forças que actuam sobre a partícula, designadamente, a força gravítica e a força de atrito.

A força gravítica, pode ser representada pela seguinte equação:

$$|\vec{F}_g| = (\rho_s - \rho_f)gV \quad (2)$$

Por sua vez, a força de atrito iguala o somatório das forças de resistência do meio e pode ser decomposta em duas componentes associadas, respectivamente, às forças de inércia e às forças viscosas. A expressão normalmente utilizada para quantificar esta força é:

$$|\vec{F}_a| = \frac{C_D A_p \rho_f v_s^2}{2} \quad (3)$$

Assim, na sedimentação discreta de uma partícula sólida num meio fluido, o equilíbrio entre as forças gravíticas e as forças de atrito, traduzido pela igualdade entre as equações (2) e (3), permite quantificar o valor da velocidade terminal de sedimentação das partículas sólidas, dada pela seguinte equação:

$$v_s = \sqrt{\left(\frac{2g(\rho_s - \rho_f)V}{C_D \rho_f A_p} \right)} \quad (4)$$

ou, quando as partículas são esféricas:

$$v = \sqrt{\frac{4}{3} \left(\frac{g \phi (\rho_s - \rho_f)}{C_D \rho_f} \right)} \quad (5)$$

Nas águas residuais, o meio líquido é um fluido com comportamento reológico do tipo *Newtoniano* e, por isso, a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas, desenvolvidas no processo de sedimentação discreta de partículas sólidas esféricas pode ser dada pelo número de *Reynolds* da partícula sólida que, neste caso, assume a forma:

$$Re_\phi = \frac{\phi v_s \rho_f}{\mu} \quad (6)$$

e o coeficiente de arrastamento, $C_D = f(Re_\phi)$, pode ser determinado da seguinte forma:

- para baixos números de *Reynolds* ($Re_\phi < 1$), a decantação dá-se em regime laminar. Neste regime predominam as forças de natureza viscosa, sendo o coeficiente de arrastamento dado pela seguinte expressão:

$$C_D = \frac{24}{Re_\phi} \quad (7)$$

substituindo na equação (5), referente à sedimentação de partículas esféricas, obtém-se a conhecida *lei de Stokes*:

$$v_s = \frac{g(\rho_s - \rho_f)\phi^2}{18\mu} \quad (8)$$

- para números de *Reynolds* intermédios ($1 < Re_\phi < 1000$), as forças de inércia e as forças viscosas assumem um peso relativo igualmente importante. Neste caso, o movimento diz-se em regime de transição do laminar para o turbulento.
- para números de *Reynolds* elevados ($Re_\phi > 1000$) o movimento diz-se em regime turbulento. As forças de resistência predominantes são as de inércia e o coeficiente de arrastamento pode considerar-se constante, para $1000 < Re_\phi < 2 \times 10^5$, e igual a:

$$C_D = 0,44 \quad (9)$$

Turton e Levenspiel, desenvolveram uma equação que caracteriza, com grande precisão, o coeficiente de arrastamento independentemente do valor do número de *Reynolds* sendo, portanto, aplicável a partículas

sólidas esféricas em sedimentação num meio líquido em regime laminar, de transição ou turbulento quando $Re_\phi < 2 \times 10^4$:

$$C_D = \frac{24}{Re_\phi} (1 + 0,173 Re_\phi^{0,657}) + \frac{0,413}{1 + 16300 Re_\phi^{-1,09}} \quad (10)$$

Quando as partículas não têm forma esférica, a determinação da sua velocidade de sedimentação complica-se consideravelmente devido, sobretudo, à dificuldade em definir o coeficiente de arrastamento e a área projectada que é, por sua vez, função da posição adoptada pela partícula no seu movimento descendente.

Nestes casos adopta-se um factor de forma adimensional definido da seguinte forma:

$$\phi_V = \frac{V}{\phi_a^3} \quad (11)$$

em que,

$$\phi_a = \left(4 \frac{A_p}{\pi} \right)^{0,5} \quad (12)$$

isto é, considera-se que o diâmetro aparente da partícula, é o diâmetro que teria uma partícula esférica com uma área projectada no plano horizontal (perpendicular à direcção do movimento), igual à da partícula irregular considerada.

Assim, para partículas irregulares, a velocidade de sedimentação pode ser obtida a partir da equação generalizada (4) que, neste caso, poderá ser escrita da seguinte forma:

$$v_s = \sqrt{\frac{4}{3} \left(\frac{g \phi_a \phi_V (\rho_s - \rho_f)}{C_D \rho_f} \right)} \quad (13)$$

3.3.1.2. Sedimentação Floculenta

A sedimentação floculenta ocorre quando, devido à natureza das partículas e ao aumento da sua concentração na massa líquida, partículas isoladas floculam e, conseqüentemente, aumentam de volume, passando a decantar com uma velocidade gradualmente maior.

A facilidade com que numa suspensão se desenvolvem as condições necessárias à ocorrência de uma decantação do tipo floculento depende de múltiplos factores associados, em geral, às características intrínsecas das partículas sólidas, nomeadamente, forma, natureza e granulometria, mas, também, à concentração em sólidos e ao tempo de sedimentação.

A complexidade do processo de sedimentação floculenta e, sobretudo, a multiplicidade de parâmetros envolvidos, têm constituído obstáculos à elaboração de uma teoria matemática que permita uma interpretação global do processo, como acontece no caso da sedimentação discreta.

É possível, no entanto, afirmar que, neste caso, a velocidade de sedimentação das partículas é função da profundidade do tanque de sedimentação, do tempo e das características das partículas, sendo este último parâmetro o do mais difícil quantificação matemática.

Devido às dificuldades anteriormente referidas, a análise da sedimentação floculenta, quando necessária, efectua-se, com recurso a métodos laboratoriais, em colunas de sedimentação especialmente preparadas para permitir um acompanhamento rigoroso do processo.

3.3.1.3. Sedimentação Forçada

Nos sistemas de tratamento de águas residuais, a sedimentação forçada ocorre quando se atingem concentrações bastante elevadas de sólidos.

No entanto, tal como se referiu no caso da sedimentação floculenta, também, neste caso, apenas alguns tipos de partículas sólidas, designadamente os sólidos floculentos de natureza biológica ou química, exibem um comportamento deste tipo.

Numa suspensão de sólidos floculentos, quando a concentração ultrapassa um determinado limiar, a continuação do processo de sedimentação dá origem a colisões entre as partículas sólidas.

Devido à sua natureza, estas partículas, ao colidirem, aderem e passam a formar estruturas sólidas bastante estáveis que sedimentam em conjunto impedindo, assim, o movimento em sentido contrário da água que fica, por isso, aprisionada dentro dessas estruturas, apenas conseguindo escapar-se pelas falhas e interstícios existentes.

A formulação matemática deste processo de sedimentação é, também neste caso, bastante complexa devido ao grande número de parâmetros envolvidos e à dificuldade associada à sua quantificação.

A metodologia correntemente adoptada na análise deste tipo de sedimentação, baseia-se na *teoria de Kynch*. Esta teoria relaciona, apenas, a velocidade de sedimentação das partículas sólidas com a concentração em sólidos existente, de acordo com o esquema apresentado na *figura 7*.

Na *figura 7*, identificam-se 2 zonas distintas delimitadas pelas pontos A, B e C. Considera-se que a sedimentação forçada tem início no ponto A e termina em C.

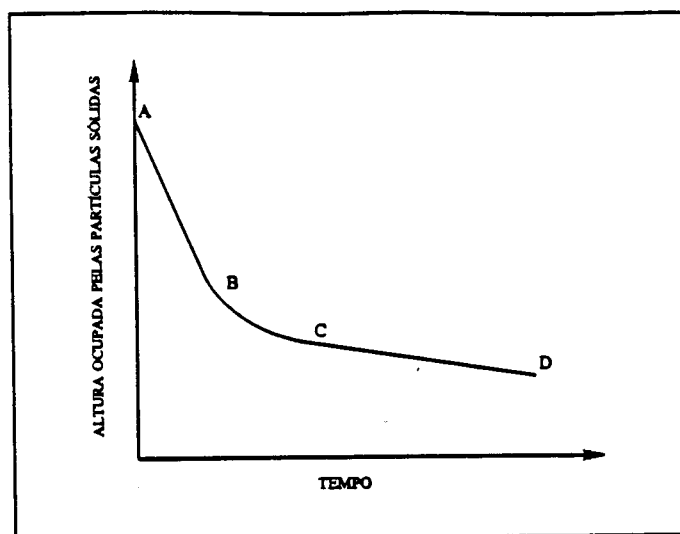


figura 7 – Esquema típico de um processo de sedimentação forçada.

Na primeira zona de sedimentação forçada, entre os pontos A e B, a sedimentação dá-se com uma velocidade constante, função, apenas, da concentração em sólidos e das características floculentas da suspensão. Entre B e C assiste-se a um progressivo abrandamento da velocidade de sedimentação motivada pela oposição crescente que as estruturas sólidas formadas colocam à libertação da água aprisionada. Após o ponto C a sedimentação passa a ter outras características denominando-se, então, sedimentação por compressão.

3.3.1.4. Sedimentação por Compressão

A sedimentação por compressão é a última fase de um processo de sedimentação e ocorre após o ponto C referenciado na *figura 7*.

Nesta fase do processo de sedimentação, as partículas sólidas estão em contacto umas com as outras e formam estruturas sólidas complexas, estáveis e dificilmente deformáveis no interior da fase líquida onde se encontram.

Estas estruturas sólidas aprisionam a água livre existente, impedindo-a de ascender livremente à superfície.

Recorre-se, por isso, frequentemente, à acção de uma ponte raspadora, dotada de uma velocidade de rotação muito baixa, com o objectivo de abrir caminhos na massa sólida por onde seja possível libertar as bolsas líquidas existentes que, por serem menos densas, são facilmente removíveis por compressão das camadas sólidas subjacentes. Favorece-se, assim, um lento e progressivo adensamento das lamas.

Este método de sedimentação é bastante utilizado no espessamento gravítico das lamas recolhidas nos órgãos de sedimentação existentes nas estações de tratamento.

3.3.2. Oxidação Biológica da Matéria Orgânica

A remoção da componente não sedimentável dos sólidos orgânicos existentes numa água residual realiza-se, normalmente, recorrendo a processos de tratamento biológicos do tipo aeróbio.

Estes processos de tratamento utilizam microrganismos aeróbios que removem as substâncias orgânicas do meio líquido envolvente, consumindo no processo oxigénio molecular dissolvido na água, que constitui a fonte de energia necessária para a realização do metabolismo que transforma os compostos orgânicos em tecido celular.

Os sólidos orgânicos afluentes ao reaktor biológico são removidos da fase líquida por um dos três mecanismos seguintes:

- por aderência das partículas sólidas aos flocos biológicos existentes;
- por adsorção físico-química da matéria coloidal ao floco biológico;
- por assimilação biológica da matéria orgânica dissolvida.

Na prática, no interior de um reaktor biológico, a remoção da matéria orgânica ocorre em duas fases. Na primeira fase, uma grande parte dos sólidos orgânicos existentes são colocados, por mecanismos físicos e químicos, em contacto permanente com a matéria biológica e, em seguida, na segunda fase, ocorre uma lenta assimilação biológica da matéria orgânica pelos microrganismos.

O modo como ocorre a assimilação biológica da matéria orgânica pelos microrganismos é função da facilidade com que estes seres vivos conseguem extrair o substrato do meio envolvente.

Assim, quando existe uma grande quantidade de matéria orgânica disponível, os microrganismos utilizam esse substrato para aumentar o seu número desenvolvendo-se de acordo com a seguinte equação bioquímica:



Por sua vez, quando o substrato disponível não é suficiente, os microrganismos recorrem às reservas que armazenaram auto-oxidando a sua própria massa celular num processo denominado por metabolismo endógeno que pode ser traduzido pela seguinte equação bioquímica:



Verifica-se, assim, que no processo de assimilação biológica do substrato existem as seguintes quatro fases:

- fase de aclimação;
- fase de crescimento;

- fase estacionária;
- fase endógena.

A primeira fase, denominada por fase de aclimação, é, em geral, bastante rápida e corresponde à fase imediatamente posterior ao contacto dos microrganismos com o substrato. Nesta fase os seres vivos existentes adaptam-se ao meio desenvolvendo as características mais adequadas para efectuar a assimilação do substrato.

Passa-se, em seguida, à fase de crescimento. Nesta fase, existe grande quantidade de alimento no meio pelo que os microrganismos consomem esse alimento, de acordo com a equação (14), desenvolvendo-se com uma rapidez limitada, apenas, pela sua capacidade de assimilação do substrato.

Na terceira fase do processo, denominada fase estacionária, verifica-se um equilíbrio entre a quantidade de microrganismos e de substrato disponível, existindo, por isso, um equilíbrio entre os dois tipos de reacções bioquímicas referidas anteriormente.

Na última fase da oxidação da matéria orgânica, o substrato existente no meio é muito reduzido pelo que os microrganismos passam a metabolizar o seu próprio tecido celular num processo denominado por metabolismo endógeno. Nesta fase, ocorre uma redução acentuada do número de microrganismos porque apenas uma pequena parte das reacções bioquímicas existentes se destinam a produzir novas batérias.

Apresenta-se, na *figura 8*, uma representação gráfica do processo teórico de assimilação biológica do substrato existente num meio líquido por parte dos microrganismos.

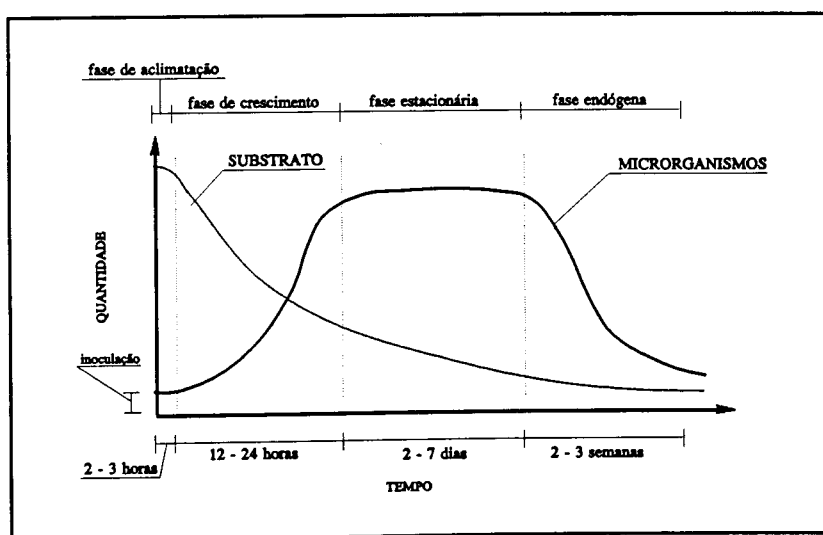


figura 8 – Assimilação biológica do substrato existente num meio líquido por parte dos microrganismos.

A quantidade de substrato existente no meio não condiciona, apenas, a quantidade de microrganismos presentes mas, também, o seu tipo.

Apresenta-se, na **figura 9**, um gráfico que tipifica a evolução das colónias de bactérias e rotíferos em função do tempo, durante um processo de estabilização biológica da matéria orgânica.

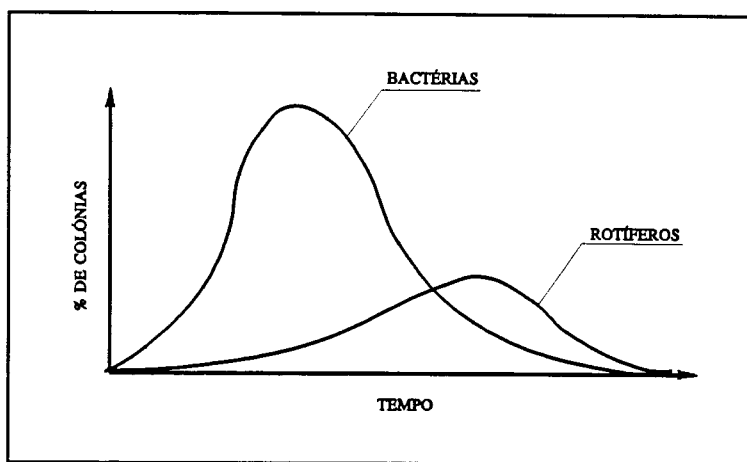


figura 9 – Evolução das colónias de bactérias e rotíferos durante o processo de oxidação biológica da matéria orgânica (adaptado de Metcalf & Eddy [51]).

Analisando a **figura 9**, constata-se que as bactérias assumem um papel fundamental na bio-oxidação da matéria orgânica mas, na fase final do processo, os rotíferos tornam-se predominantes.

Os processos biológicos de tratamento de águas residuais normalmente adoptados nas estações de tratamento podem ser, genericamente, divididos em sistemas com meio biológico em suspensão e sistemas com meio biológico fixo, em função da forma como os microrganismos se encontram no interior do reactor biológico.

Nos processos de tratamento com o meio biológico em suspensão, destaca-se o processo por lamas activadas enquanto que nos sistemas com meio biológico fixo merece particular destaque o processo por leitos percoladores.

A análise detalhada dos processos de tratamento existentes nos reactores biológicos ultrapassa o âmbito desta Dissertação pelo que se apresentam em seguida, apenas, os conceitos fundamentais subjacentes ao dimensionamento dos reactores biológicos por lamas activadas com especial destaque para a quantificação dos volumes de lamas produzidos.

A escolha deste sistema de tratamento prende-se com o facto de ser este o processo biológico de tratamento com aplicação mais generalizada e, em particular, existente na ETAR que forneceu as lamas utilizadas nos estudos experimentais realizados.

Apresenta-se, na **figura 10**, um esquema tipo do funcionamento deste processo de tratamento.

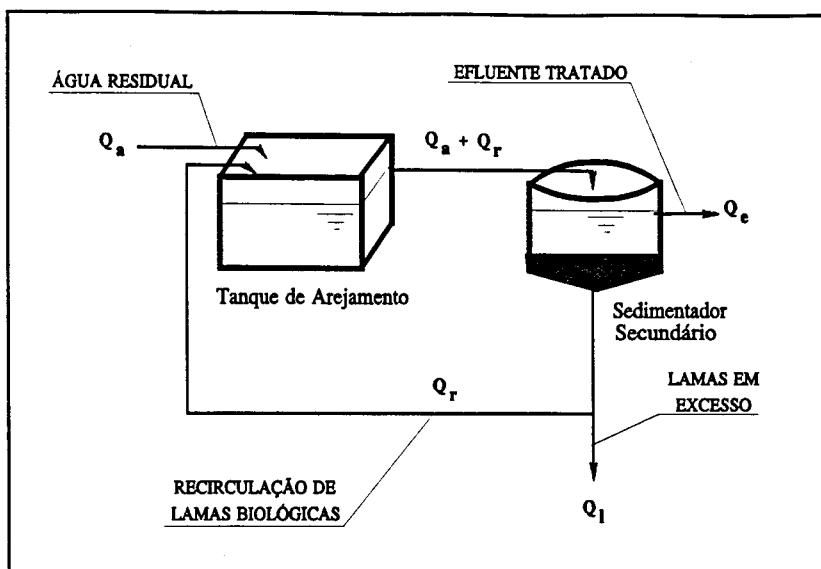


figura 10 – Funcionamento típico de um sistema de tratamento por lamas activadas.

No tanque de lamas activadas, os microrganismos encontram-se em suspensão em concentrações bastante elevadas que podem ir de 1000 a 5000 mg/ℓ.

O oxigénio necessário à manutenção das condições aeróbias no tanque é fornecido, mecanicamente, por turbinas ou por difusores de ar comprimido.

Para manter a concentração desejada de microrganismos no tanque, também designado por reactor biológico, é necessário recircular uma determinada quantidade de lamas biológicas sedimentadas no sedimentador secundário.

Constata-se, assim, que um dos parâmetros que assume maior importância no dimensionamento de um reactor biológico por lamas activadas é a relação entre a quantidade de substrato e de microrganismos existente no tanque. É com base nessa grandeza, denominada por carga mássica, que se definem as três variantes principais do sistema de tratamento por lamas activadas:

- arejamento prolongado;
- convencional;
- alta carga.

Estas variantes correspondem, na prática, a diferentes valores para a carga orgânica existente no processo e, conseqüentemente, ao posicionamento do ponto de funcionamento da reacção bioquímica em fases distintas do processo de assimilação biológica do substrato, garantindo que as lamas biológicas produzidas apresentem características de sedimentabilidade optimizadas, isto é, que o IVL (*índice de volume de lamas ou índice de Mohlman*) atinja um valor mínimo.

Define-se índice de volume de lamas como o volume ocupado por 1,0 g de lamas biológicas (em mℓ) após 30 minutos de sedimentação. Nos processos de tratamento biológicos este valor atinge um valor mínimo de 100 para três gamas de valores distintos da carga mássica considerada.

Apresenta-se, na *figura 11*, um esquema interpretativo do processo, identificando-se três zonas onde a assimilação biológica do substrato resulta na formação de flocos biológicos com boas características de sedimentabilidade.

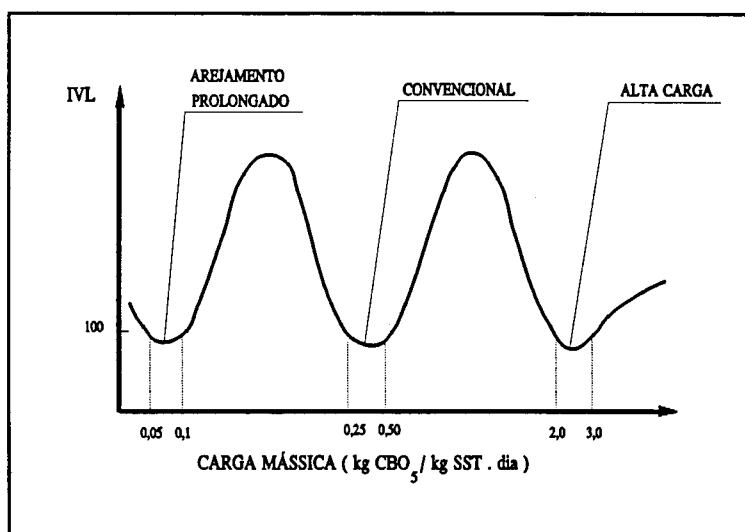


figura 11 – Relação entre a carga mássica e as características de sedimentabilidade das lamas no processo de tratamento por lamas activadas.

Essas três zonas correspondem às três variantes anteriormente referidas para o processo de tratamento por lamas activadas verificando-se que, na variante por arejamento prolongado, as condições prevalecentes no meio são de escassez de alimento, estando-se por isso na fase endógena, enquanto que na variante convencional o processo de assimilação biológica se localiza na fase estacionária e, por último, na variante por alta carga existe uma grande abundância de alimento estando-se, por isso, na fase de crescimento.

A produção de lamas no sedimentador secundário está, por isso, intimamente ligada à variante de tratamento por lamas activadas existente. Com efeito, devido ao tipo de metabolismo biológico predominante em cada uma das variantes referidas, haverá uma produção distinta de microrganismos em excesso que é necessário retirar do sistema. A produção de lamas é, assim, mais elevada na variante por alta carga e mínima na variante por arejamento prolongado.

Concluindo, a produção de lamas em excesso pode ser considerada função da carga orgânica removida no reactor biológico e será em média, para cada uma das variantes consideradas, de:

- | | |
|-------------------------|--------------------------------------|
| – arejamento prolongado | 0,4 Kg ST/Kg CBO _{removido} |
| – convencional | 0,8 Kg ST/Kg CBO _{removido} |
| – alta carga | 1,2 Kg ST/Kg CBO _{removido} |

3.3.3. Produção de Lamas numa Estação de Tratamento

As lamas produzidas nas estações de tratamento são resultantes da decantação das partículas sólidas nos órgãos de sedimentação existentes que são os sedimentadores primários e secundários. Apresenta-se, em seguida, uma análise das consequências que os critérios de dimensionamento normalmente adoptados têm nas características das lamas e, também, uma estimativa dos volumes de lamas produzidos.

3.3.3.1. *Sedimentadores Primários*

O dimensionamento dos sedimentadores primários é feito, em geral, considerando uma taxa de aplicação superficial ao caudal de ponta de **25 a 30 m³/m²/dia**. Este valor significa, na prática, que a velocidade média do escoamento no interior do tanque não deve ultrapassar cerca de **3,5x10⁻⁴ m/s**.

Com este valor para a velocidade do escoamento no tanque e admitindo que ocorre sedimentação discreta das partículas sólidas, é possível garantir a remoção completa de todas as partículas com uma velocidade de decantação superior a esse valor e uma remoção parcial das partículas com velocidades de decantação inferiores. Neste caso, a percentagem de remoção poderá ser considerada equivalente à razão entre a velocidade de decantação das partículas e a velocidade do escoamento.

A aplicação dos princípios anteriormente referidos para decantação discreta das partículas sólidas, ao caso específico da sedimentação nos sedimentadores primários, é feita por aplicação da *lei de Stokes*, admitindo que as partículas são esféricas. Constata-se, assim, que o diâmetro mínimo das partículas totalmente removidas no sedimentador primário situa-se na gama de **60 a 75 µm**.

A remoção de sólidos nos sedimentadores primários inclui, assim, a totalidade dos sólidos sedimentáveis e uma parte dos supra-coloidais, representando, em conjunto, cerca de **2/3** da totalidade dos sólidos em suspensão.

Assim, de acordo com o exposto no *quadro 2*, cerca de **270 mg/l** dos sólidos em suspensão sedimentam e são removidos no sedimentador primário formando uma lama que se denomina por lama primária. Esta lama apresenta, normalmente, uma concentração em sólidos situada entre **2% e 4%**.

3.3.3.2. *Sedimentadores Secundários*

Ao contrário do que acontece nos sedimentadores primários, os processos de sedimentação que ocorrem nos sedimentadores secundários são, predominantemente, de natureza floculenta e forçada.

Efectivamente, os sólidos biológicos produzidos no reactor biológico localizado imediatamente a montante do sedimentador secundário, são sólidos floculentos constituídos por colónias bastante complexas de microrganismos e, além disso, as concentrações em sólidos nos reactores biológicos são bastante elevadas.

Assim, num processo por lamas activadas, a concentração de lamas no tanque de arejamento pode variar entre 2000 e 3000 mg/ℓ no caso das variantes convencional e alta carga, atingindo valores de 3000 a 5000 mg/ℓ na variante por arejamento prolongado.

As taxas de aplicação superficial adoptadas no dimensionamento dos sedimentadores secundários são, normalmente, ligeiramente inferiores às referidas para os sedimentadores primários e situam-se na gama de 20 a 30 m³/m²/dia.

Os sedimentadores secundários são, no entanto, órgãos de decantação com um funcionamento mais complexo do que os sedimentadores primários pois, as suas funções não se restringem à sedimentação eficiente das partículas sólidas mas, devem, também, proporcionar um adensamento suficiente da massa biológica decantada.

Estes órgãos de tratamento devem, por isso, possuir na sua zona inferior um manto de lamas com uma profundidade suficiente para permitir uma conveniente concentração dos sólidos decantados.

Atendendo a que o tempo de retenção no interior do sedimentador secundário é, sempre, superior a 1,5 horas e as condições de funcionamento do reactor biológico são mantidas dentro dos limites estabelecidos para a variante do processo por lamas activadas adoptada, as lamas biológicas retiradas do sedimentador secundário têm um IVL próximo de 100, o que significa que a sua concentração em sólidos será de cerca de 1%.

Na realidade, a concentração das lamas biológicas retiradas do sedimentador secundário poderá variar entre 0,7% e 1,0%, em função das condições de operação do sistema.

3.3.3.3. *Volume de Lamas Produzidas*

A relação entre o volume de lamas e a respectiva massa de partículas sólidas é dada pela seguinte equação:

$$V_L = \frac{M_s}{\rho_L \times \%_{ST}} \quad (16)$$

Admitindo que no tratamento biológico a eficiência do tratamento é de 70% e de 95%, respectivamente, na variante por alta carga e nas outras variantes, apresenta-se no *quadro 3* um resumo da produção de lamas previsível nas estações de tratamento de águas residuais com tratamento biológico por lamas activadas.

Conclui-se, assim, que o volume total de lamas produzido numa ETAR varia entre cerca de 1,4% e 2,8% do volume total de águas residuais tratadas.

Refere-se, no entanto, que para outros sistemas de tratamento e, sobretudo, no tratamento de efluentes industriais, esta percentagem pode ser consideravelmente superior, atingindo, em alguns casos, valores da ordem de 20% dos efluentes tratados. Estes casos são, contudo, muito especiais e não se incluem no âmbito

da presente Dissertação onde a análise se restringe às lamas resultantes do tratamento de águas residuais urbanas.

VARIANTE	TRATAMENTO PRIMÁRIO			TRATAMENTO SECUNDÁRIO			TOTAL	
	CBO ₅ removido (Kg/m ³)	Matéria Sólida (Kg/m ³)	Lamas Produzidas (ℓ/m ³)	CBO ₅ removido (Kg/m ³)	Matéria Sólida (Kg/m ³)	Lamas Produzidas (ℓ/m ³)	Lamas Produzidas (ℓ/m ³)	% Sólidos
CONVENCIONAL	0,140	0,270	8	0,250	0,200	18	26	1,6
AREJAMENTO PROLONGADO	–	–	–	0,380	0,150	14	14	1,0
ALTA CARGA	0,140	0,270	8	0,180	0,220	20	28	1,6

quadro 3 – Estimativa da remoção de CBO₅ e da produção de lamas em ETAR's com tratamento biológico por lamas activadas

Após serem misturadas, as lamas primárias e as lamas biológicas em excesso passam a designar-se por lamas brutas. Estas lamas são, em seguida, encaminhadas para o sistema de tratamento de lamas onde se realizam as operações consideradas necessárias para garantir que o seu desembaraçamento final ocorra em condições sanitárias e ambientais aceitáveis.

3.4. TRATAMENTO DAS LAMAS

As lamas primárias e biológicas extraídas dos órgãos de tratamento, constituem o resíduo final do tratamento dos efluentes e incluem, por isso, todas as suas cargas poluentes, ou seus derivados, conferindo-lhes características extremamente agressivas que dificultam o seu desembaraçamento final.

Por este motivo, nas estações de tratamento é necessário prever a existência de uma zona específica onde se realiza o tratamento das lamas. Esta zona funciona paralelamente ao tratamento da fase líquida e inclui várias etapas de tratamento destinadas a transformar essa suspensão de sólidos em água, num produto final susceptível de ser eliminado de uma forma ambientalmente satisfatória.

O processo de tratamento das lamas produzidas numa ETAR inclui, normalmente, as seguintes etapas:

- espessamento;
- estabilização;
- condicionamento químico;
- desidratação.

A primeira etapa do tratamento de uma lama bruta consiste, em geral, no seu espessamento. Procura-se, deste modo, aumentar o teor em sólidos das lamas reduzindo o volume de lamas a tratar e, consequentemente, a dimensão dos órgãos de tratamento destinados ao seu tratamento.

Por sua vez, o processo de estabilização das lamas destina-se a reduzir o seu teor em matéria orgânica putrescível. Com efeito, o carácter ofensivo das lamas resulta, fundamentalmente, da decomposição biológica anaeróbia da matéria orgânica existente e, em particular, da mais facilmente biodegradável. Assim, a utilização de processos biológicos de tratamento destinados a remover estas substâncias, permite obter um produto final mais estável facilitando, por isso, o seu transporte e deposição final.

A estabilização biológica da matéria orgânica efectua-se, normalmente, com recurso a processos biológicos anaeróbios pois estes processos, para além de consumirem muito menos energia do que os aeróbios, permitem, ainda, em alguns casos, utilizar o biogás produzido na fermentação anaeróbia da matéria orgânica, como fonte de energia reduzindo, assim, a dependência energética da estação de tratamento e diminuindo os custos de exploração.

Os reactores biológicos onde se processa a decomposição biológica da matéria orgânica são os digestores anaeróbios e, por isso, as lamas extraídas destes órgãos são designadas por lamas digeridas. Estas lamas são muito mais homogéneas e estáveis do que as lamas brutas e, após redução do seu teor de humidade, podem ser facilmente transportadas para um destino final.

No entanto, quando se utilizam meios mecânicos para a desidratação das lamas, é necessário prever a montante destes equipamentos uma etapa destinada ao condicionamento químico das lamas. Efectivamente, as lamas digeridas são, ainda, constituídas por uma percentagem bastante elevada de matéria orgânica que, embora já não seja muito rapidamente biodegradável, apresenta propriedades hidrofílicas bastante acentuadas.

A eficácia do processo de desidratação das lamas está, assim, dependente da separação prévia dessa água, designada "*bound water*", das partículas sólidas. O condicionamento químico das lamas consiste, por isso, na adição de reagentes químicos aniónicos (normalmente polielectrólitos), que, destruindo as ligações eléctricas superficiais existentes entre as partículas sólidas e a água, permitem a sua fácil separação durante o processo de desidratação.

A derradeira etapa de tratamento existente numa ETAR consiste na desidratação das lamas. A desidratação das lamas por secagem em leitos de secagem é um processo ultrapassado, em especial nos médios e grandes sistemas de tratamento. Actualmente, recorre-se, em geral, a processos mecânicos de filtração ou de centrifugação. Aplicando estes métodos obtém-se um produto final, designado por lama desidratada, com um teor em sólidos variável entre 20% e 40%, em função do método de desidratação utilizado.

As escorrências rejeitadas nas etapas de espessamento e de desidratação das lamas são líquidos com concentrações elevadas em cargas poluentes e que devem, por isso, ser recirculados para o início da ETAR, para serem tratados em conjunto com as águas residuais afluentes.

Na *figura 12* apresenta-se um fluxograma típico de uma linha de tratamento de lamas resultantes do tratamento de águas residuais urbanas.

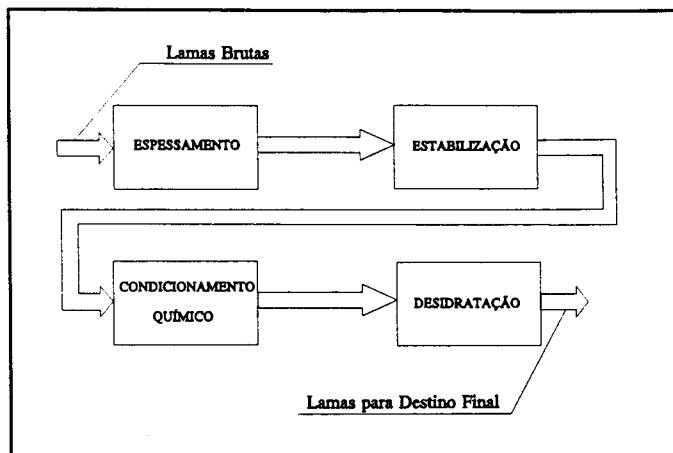


figura 12 – Fluxograma de um processo típico de tratamento de lamas.

Importa, ainda, referir que, embora numa estação de tratamento de águas residuais o volume de lamas produzido seja, apenas, de cerca de 2,5% do volume dos efluentes tratados, o seu tratamento completo, com os processos anteriormente referidos, conduz a custos de primeiro investimento e de exploração bastante superiores aos necessários para realizar o tratamento da fase líquida, requer a utilização de operadores mais especializados e é responsável por uma grande parte dos problemas associados à exploração da ETAR, nomeadamente, avarias nos equipamentos, maus cheiros e degradação prematura dos materiais.

Devido à importância que os processos de tratamento referidos têm nas características das lamas e, consequentemente, na interpretação dos estudos experimentais realizados no âmbito da presente Dissertação, apresenta-se, em seguida, uma análise dos processos de tratamento anteriormente referidos.

3.4.1. Espessamento

A primeira etapa do tratamento das lamas consiste no seu espessamento, ou seja, na redução do seu volume total por separação de um determinado volume de água, utilizando, para isso, técnicas que permitam melhorar os processos físicos de sedimentação existentes nos sedimentadores.

Existem, em geral, os seguintes três métodos para espessar as lamas brutas:

- espessamento gravítico;
- flutuação;
- centrifugação.

O espessamento gravítico é o método utilizado com maior frequência para efectuar o espessamento das lamas. Neste método, o espessamento realiza-se num espessador com características muito semelhantes às dos

sedimentadores, mas onde, de acordo com a classificação apresentada em 3.3.1., a sedimentação das partículas sólidas ocorre, sobretudo, por compressão.

Para permitir o eficaz espessamento das lamas, os espessadores gravíticos estão equipados com uma ponte raspadora com características especialmente adaptadas ao movimento num meio líquido com elevadas concentrações em sólidos. O seu movimento favorece a libertação da água livre existente nas lamas, que ascende à superfície livre sendo descarregada por descarregadores superficiais, enquanto as lamas espessadas são extraídas pelo fundo do tanque.

Os espessadores gravíticos devem ser suficientemente profundos para que o peso das camadas de partículas sólidas sobrejacentes permita uma eficaz compactação dos sólidos localizados nas zonas mais profundas do tanque. Pelo contrário, o tempo de retenção no espessador deve ser reduzido ao mínimo indispensável para limitar a ocorrência de processos biológicos anaeróbios no interior do tanque pois, nesse caso, o biogás produzido no processo arrastará, no seu movimento ascendente, partículas sólidas impedindo a sua eficaz compactação.

Os espessadores gravíticos são, tradicionalmente, os órgãos de espessamento mais utilizados nas estações de tratamento. Contudo, a experiência acumulada sobre o funcionamento destes órgãos revela que são, em geral, pouco fiáveis.

Efectivamente, é praticamente impossível evitar o início do processo de decomposição biológica anaeróbia da matéria orgânica no interior destes tanques, o que reduz substancialmente a sua eficiência de compactação dos sólidos e, além disso, constituem uma fonte permanente de problemas devido à libertação de odores muito ofensivos para a atmosfera.

A principal vantagem associada à utilização destes órgãos consiste na possibilidade de utilizá-los, em simultâneo com o espessamento, como tanques de armazenamento de lamas permitindo, assim, uma regulação dos caudais extraídos dos sedimentadores e dos caudais de alimentação dos órgãos seguintes de tratamento de lamas, otimizando, deste modo, os respectivos processos de tratamento.

Por sua vez, o espessamento por flutuação não é um processo vulgarmente utilizado, embora tenha uma eficiência, medida em termos de concentração final das lamas, bastante superior ao espessamento gravítico.

No entanto, em termos técnicos, são órgãos bastante mais complexos, necessitando, normalmente, da adição prévia de um floculante e não permitindo o armazenamento de quantidades significativas de lamas. Em termos económicos, os custos de primeiro investimento e de exploração são bastante superiores aos dos espessadores gravíticos.

O recurso à centrifugação no espessamento de lamas é um método mais recente do que os anteriores mas que está, actualmente, em expansão particularmente nos grandes sistemas de tratamento.

Importa referir que as centrífugas utilizadas no espessamento das lamas têm características distintas das utilizadas na sua desidratação mecânica pois, neste caso, apenas se pretende separar a água livre existente nas lamas brutas.

As centrífugas embora tenham os mesmos tipos de problemas que os espessadores por flutuação, isto é, custos elevados, dificuldade em regular caudais e necessidade de recorrer a um flocculante, são muito úteis no espessamento de lamas nas grandes estações de tratamento porque permitem reduzir substancialmente o volume de lamas a tratar nos órgãos seguintes de tratamento.

Por último, refere-se que os teores em sólidos previsíveis para as lamas brutas à saída dos espessadores são os seguintes:

- | | |
|-------------------------------|--------------|
| – espessadores gravíticos | 2,0% a 4,0%; |
| – espessadores por flutuação | 3,5% a 5,0%; |
| – centrífugas de espessamento | 6,0% a 8,0%. |

3.4.2. Estabilização

A estabilização das lamas em digestores anaeróbios constitui a metodologia mais utilizada para remover a matéria orgânica mais facilmente biodegradável existente nas lamas. Efectivamente, os outros processos de estabilização de lamas existentes, designadamente, químicos, térmicos e, mesmo, biológicos aeróbios, quando comparados segundo uma análise técnica e económica com os processos biológicos anaeróbios, são, em geral, menos favoráveis.

Pode-se, mesmo, afirmar que a digestão anaeróbia das lamas brutas é o processo de estabilização que melhor se adapta às características das lamas e aos objectivos de tratamento, normalmente pretendidos.

A digestão anaeróbia das lamas brutas é um processo biológico de tratamento realizado por bactérias anaeróbias. A assimilação biológica da matéria orgânica em meio anaeróbio é um processo normalmente denominado por fermentação e resulta na formação de mais tecido celular (bactérias) e biogás.

Embora o objectivo deste tratamento seja semelhante ao existente nos processos de oxidação biológica da matéria orgânica, os mecanismos biológicos envolvidos são totalmente diferentes. Por este motivo efectua-se, em seguida, uma descrição dos processos biológicos existentes na digestão anaeróbia das lamas que constitui a etapa fundamental de qualquer processo de tratamento de lamas.

3.4.2.1. Digestão Anaeróbia

O processo de assimilação biológica anaeróbia da matéria orgânica é um processo bastante complexo que se desenrola em três fases distintas mas interdependentes.

Apresenta-se, na *figura 13*, o diagrama sequencial do processo de digestão anaeróbia de lamas.

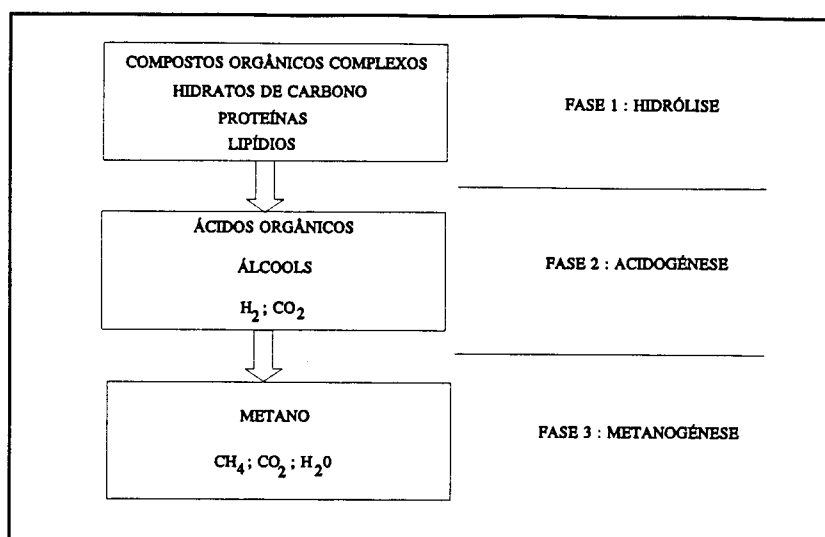


figura 13 – Diagrama sequencial do processo de digestão anaeróbia de lamas (adaptado de WPCF [86]).

A primeira fase da decomposição da matéria orgânica, denominada hidrólise, consiste na redução dos compostos orgânicos complexos existentes na lama em compostos mais simples assimiláveis pelas bactérias. Nesta fase da digestão, compostos como os lipídios, polisacarídeos, proteínas e ácidos orgânicos são enzimaticamente decompostos em substâncias mais simples solúveis na água, designadamente, monossacarídeos, aminoácidos, ácidos gordos, compostos aromáticos simples, amónia e muitas outras substâncias.

Na segunda fase do tratamento, denominada acidogénese, os produtos resultantes da hidrólise são convertidos, por acção de bactérias acidogénicas, em ácidos orgânicos, nomeadamente, ácido acético, propiónico, láctico e outros ácidos orgânicos de baixo peso molecular e, também, álcools, hidrogénio e dióxido de carbono.

Na última fase do processo de digestão anaeróbia, outro tipo de bactérias, as metanogénicas, convertem as substâncias produzidas na fase anterior, fundamentalmente em metano, dióxido de carbono e água.

Devido à existência de três fases distintas no processo de digestão, o sucesso do processo é dependente em grande medida do equilíbrio que se consegue manter entre essas três fases.

Com efeito, as bactérias responsáveis pelos processos existentes em cada uma das três fases referidas, são de natureza diferente e podem limitar a velocidade com que se processa a decomposição da matéria orgânica, se as condições prevalescentes no meio não forem as mais favoráveis para a sua sobrevivência.

Em geral, a primeira e a terceira fase do processo são as fases mais sensíveis e que podem, por isso, limitar a evolução do processo de assimilação biológica anaeróbia da matéria orgânica.

Assim, muitos dos compostos orgânicos presentes nas lamas são, devido à sua complexidade, muito lentamente hidrolizados pelas enzimas segregadas pelas bactérias. Por sua vez, na terceira fase do processo, as bactérias metanogénicas são extremamente sensíveis a flutuações do pH e à temperatura.

A manutenção de um reactor biológico anaeróbio em funcionamento é uma tarefa bastante complexa pois pressupõe a obtenção de um equilíbrio entre as três etapas distintas que constituem o processo de estabilização biológica das lamas.

Assim, os principais factores que condicionam o desenvolvimento das condições ideais em que ocorre o processo de digestão anaeróbia das lamas são os seguintes:

- **temperatura:** os microrganismos são muito sensíveis à temperatura existente no reactor. As condições ideais são as mesofílicas (32 a 35°C) com as lamas sujeitas, apenas, a pequenas flutuações da sua temperatura. Nestas condições ocorre um crescimento acelerado do número de microrganismos e, conseqüentemente, diminui-se o tempo necessário à digestão das lamas;
- **capacidade do reactor:** a capacidade do reactor está intimamente relacionada com o tempo de retenção hidráulica das lamas e é, por isso, directamente proporcional ao grau de estabilização atingido pelo produto final;
- **agitação:** a agitação das lamas no reactor anaeróbio permite acelerar o processo biológico porque aumenta as possibilidades de contacto entre o substrato e os microrganismos. Permite, além disso, uma homogeneização das características das lamas no interior do reactor, tanto em termos da sua concentração em sólidos, como da temperatura e do seu grau de digestão;
- **pH:** os microrganismos, em particular os metanogénicos são muito sensíveis ao pH existente no meio. As condições ideais ao seu desenvolvimento encontram-se entre um pH de 6,0 e de 8,0, diminuindo muito rapidamente a sua eficácia para outros valores do pH. O controlo do pH é particularmente importante durante a fase de arranque do reactor quando não estão ainda criadas as condições de equilíbrio entre as três fases que constituem o processo.

Dependendo da sua dimensão e do volume de lamas produzido, o processo de digestão anaeróbia das lamas pode incluir um ou dois órgãos de tratamento.

No primeiro, designado por digestor primário, efectua-se a digestão propriamente dita das lamas, isto é, a redução biológica anaeróbia de uma parte dos sólidos voláteis existentes.

Por sua vez, no segundo, denominado por digestor secundário, realiza-se, fundamentalmente, o espessamento das lamas digeridas e o seu armazenamento temporário antes da passagem às fases seguintes do tratamento.

Normalmente, em pequenos sistemas de tratamento, com volumes diários de lamas produzidas diminutos, recorre-se, apenas, a uma única etapa de digestão. Neste caso, prescinde-se do espessamento prévio das lamas brutas e realiza-se a digestão e o espessamento das lamas em simultâneo no mesmo órgão de tratamento. A digestão das lamas não é aquecida, ocorrendo à temperatura ambiente e não existe qualquer tipo de aproveitamento para o biogás produzido no processo que é libertado directamente para a atmosfera.

A ausência de agitação no interior do tanque favorece a ocorrência de uma estratificação das lamas. Forma-se, assim, na parte inferior do digestor, uma zona com lamas espessadas em digestão anaeróbia e, na parte superior, uma zona constituída por um líquido com poucos sólidos em suspensão mas com cargas poluentes, medidas em termos de CBO, CQO e nutrientes bastante elevadas. Esta zona pode chegar a ocupar cerca de 50% do volume do digestor, devendo, por isso, prever-se a remoção periódica deste líquido que, pelas razões anteriormente referidas, deve ser recirculado para o início do processo de tratamento.

Estes digestores são designados por digestores anaeróbios não aquecidos e são, geralmente, dimensionados para tempos de retenção das lamas de cerca de 45 a 60 dias. A sua principal vantagem está na grande simplicidade de operação que se resume, em geral, às operações diárias de carga de lamas brutas e descarga de lamas digeridas e, periodicamente, à remoção dos sobrenadantes e escorrências.

No entanto, a sua baixa eficácia de tratamento, medida em termos do tempo necessário para realizar a digestão das lamas, desaconselha a adopção deste processo de digestão em grande parte dos sistemas de tratamento e, em especial, nos de maiores dimensões.

Apresenta-se, na *figura 14*, um esquema tipo de um digestor anaeróbio não aquecido.

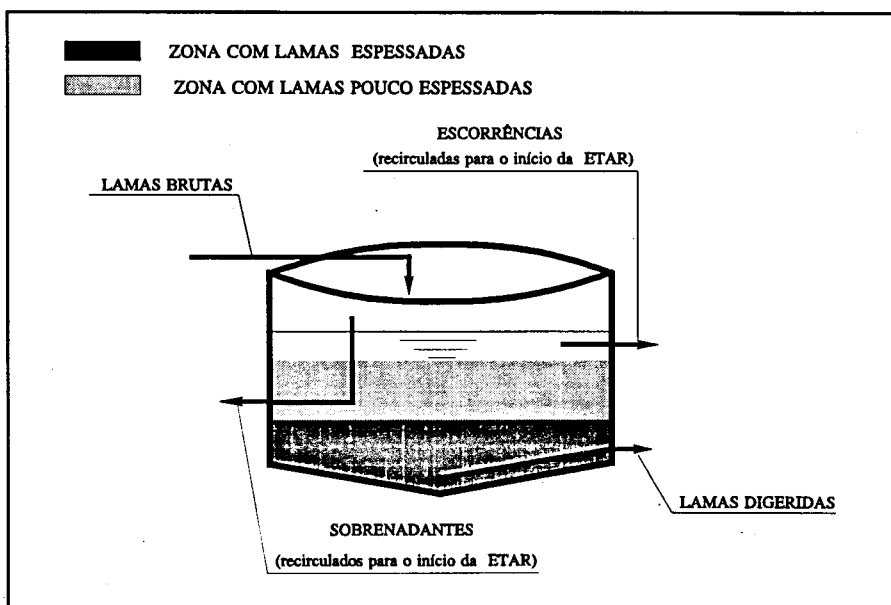


figura 14 – Representação esquemática de um digestor anaeróbio não aquecido.

Embora seja, teoricamente, possível efectuar a cobertura do digestor de modo a armazenar e utilizar o biogás produzido no processo de digestão das lamas para produção de energia eléctrica, tem-se verificado, na prática, que os investimentos necessários para o desenvolvimento deste sistema não são justificáveis do ponto de vista económico pois conduzem a taxas internas de rentabilidade muito inferiores às normalmente consideradas como mínimas aceitáveis para investimentos desta natureza.

Para médios e, sobretudo, para grandes sistemas de tratamento, quando os volumes diários de lamas a tratar são já bastante elevados, a utilização de digestores do tipo anteriormente descrito não é aconselhável tanto por razões técnicas como por razões económicas.

Nestes casos, recorre-se, normalmente, a outros métodos de digestão de lamas mais sofisticados, capazes de permitir uma rápida e completa estabilização das lamas, minimizando o volume dos órgãos destinados ao seu tratamento e rentabilizando o processo de tratamento, através da recuperação do biogás produzido no processo, utilizando-o como fonte de energia.

Neste processo, a digestão das lamas ocorre, em geral, em duas etapas, a digestão primária e a digestão secundária. A digestão primária realiza-se num digestor anaeróbio fechado, aquecido e com agitação, enquanto que a digestão secundária se realiza num tanque aberto de menores dimensões e com purgas a vários níveis, para permitir a remoção dos sobrenadantes e escorrências.

Apresenta-se, na *figura 15*, o esquema típico de um processo de digestão anaeróbia aquecida de lamas com aproveitamento do biogás produzido para agitação e aquecimento das lamas e, também, quando justificável, após uma cuidadosa análise técnico-económica, como combustível destinado à produção de energia eléctrica.

Neste sistema de tratamento de lamas, o tempo de retenção hidráulica necessário à digestão das lamas no digestor primário reduz-se a cerca de 20 dias.

Com este tempo de retenção consegue-se a redução de cerca de 50% dos sólidos voláteis existentes nas lamas que são transformados em biogás, atingindo as lamas um elevado grau de mineralização com a remoção biológica de uma parte substancial da matéria orgânica, sobretudo, a mais rapidamente putrescível.

O biogás produzido pelas bactérias metanogénicas é constituído, predominantemente, por metano e dióxido de carbono, nas proporções volumétricas de, respectivamente, 65 a 70% e 25 a 30%, mas inclui, também, pequenas quantidades de outros gases, nomeadamente monóxido de carbono, gás sulfídrico, oxigénio, hidrogénio e azoto. A produção teórica de biogás no processo de digestão anaeróbia das lamas é de cerca de $1 \text{ m}^3/\text{Kg SV}_{\text{destruído}}$ e o seu poder calorífico é de cerca de 25 000 kJ/m³.

A produção contínua de quantidades bastante elevadas de biogás obriga a prever a existência de equipamentos específicos destinados a efectuar o seu armazenamento, purificação e, também, a garantir a segurança das instalações, pois o biogás é explosivo em contacto com o ar mesmo em concentrações relativamente baixas (da ordem de 1 volume de gás para 5 de ar).

Para efectuar o armazenamento do biogás, para além do volume armazenado na parte superior (cúpula) do próprio digestor primário, recorre-se a um gasómetro, em geral de baixa pressão.

A purificação do biogás produzido, engloba, normalmente, a passagem por filtros para remoção do gás sulfídrico, do vapor de água e de partículas sólidas que possam danificar os equipamentos ou, em relação aos dois primeiros elementos, corroer as tubagens e restantes equipamentos, provocando o seu desgaste prematuro.

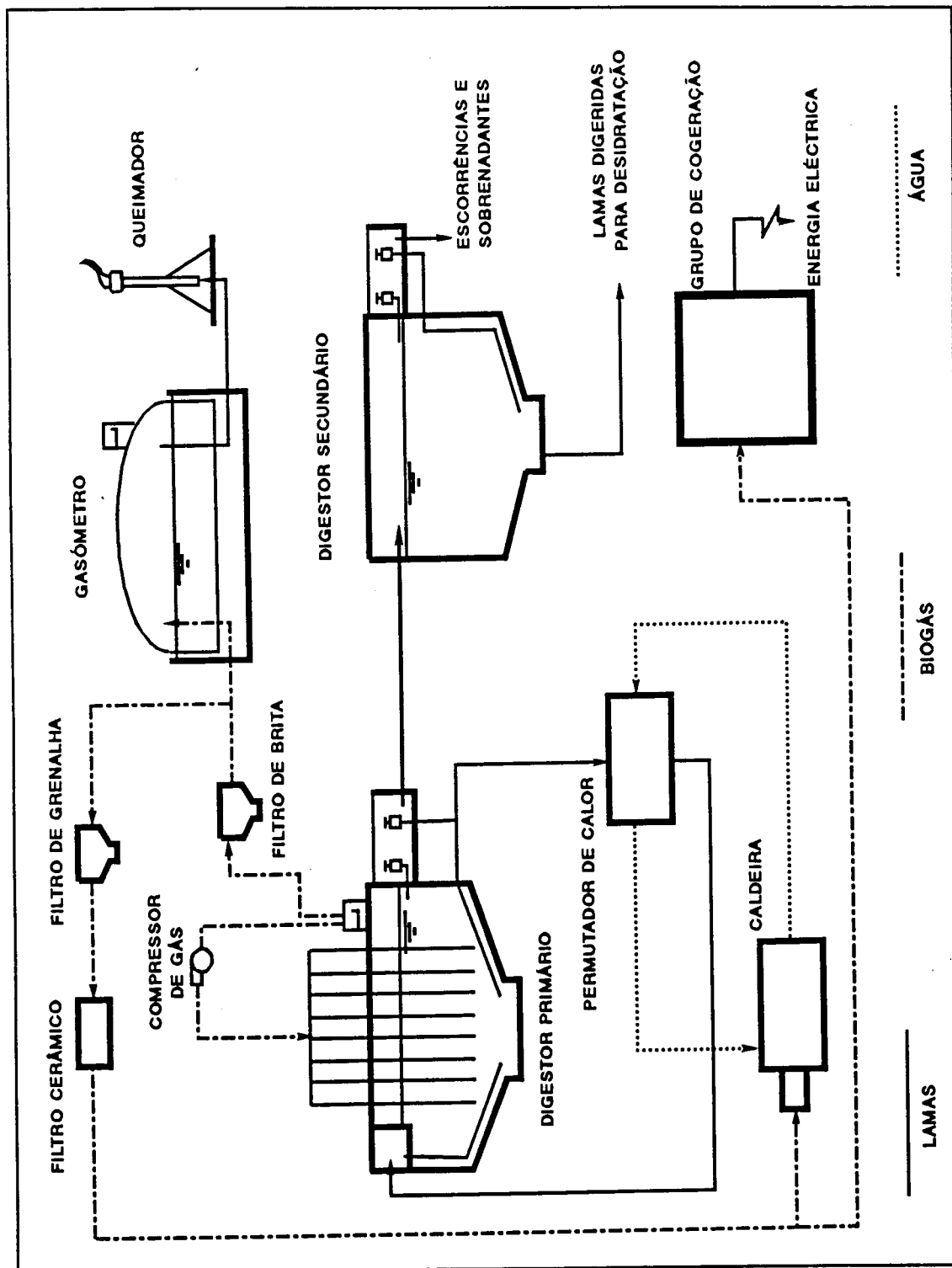


figura 15 – Fluxograma de um processo de digestão anaeróbia aquecida.

Os equipamentos de segurança existentes neste tipo de instalações incluem, normalmente, corta-chamas, electro-válvulas de segurança destinadas a evitar muito altas ou muito baixas pressões, reguladores de pressão, queimador de biogás, etc.

Para além de servir como combustível no processo de aquecimento da água que, circulando em circuito fechado entre a caldeira e o permutador de calor, permite manter as lamas no interior do digestor a uma temperatura sensivelmente constante de 32–35°C, o biogás poderá, ainda, ser utilizado na agitação do digestor primário.

Com efeito, uma metodologia eficaz para realizar a mistura das lamas no interior do digestor, consiste na injeção de biogás na zona inferior do tanque. A libertação das bolhas gasosas no interior do tanque e a sua posterior ascensão à superfície provoca uma agitação vigorosa das lamas permitindo, assim, a sua homogeneização.

Por último, o biogás em excesso poderá ser, ainda, utilizado como combustível para produção de energia eléctrica, reduzindo, assim, a dependência energética da estação de tratamento e evitando o consumo de electricidade da rede pública, pelo menos nas horas de ponta.

À saída do digestor primário, as lamas digeridas apresentam características totalmente distintas das lamas brutas. Assim, são muito menos viscosas, mais homogéneas, apresentam uma cor bastante mais escura e um cheiro muito menos ofensivo. Estas lamas são, em seguida, encaminhadas para o digestor secundário onde se realizará o seu armazenamento e, também, o seu espessamento, antes de passarem à fase final do tratamento que consiste, normalmente, no seu condicionamento químico seguido de desidratação mecânica.

O digestor secundário é dimensionado para um tempo de retenção de 2 a 4 dias, podendo admitir-se, na prática, que cerca de 15% do volume de lamas digeridas entradas no tanque é recirculado para o início da ETAR na forma de sobrenadante.

Os processos de digestão anaeróbia das lamas anteriormente referidos conduzem, em geral, à produção de lamas digeridas com as características apresentadas no *quadro 4*.

TIPO	Lamas Produzidas (ℓ/m^3)*	Sólidos Totais (%)	Sólidos Voláteis (%ST)	Sobrenadante Recirculado (ℓ/m^3)*
LAMAS BRUTAS ESPESSADAS	6 – 16	3 – 8	70	10 – 20
LAMAS DIGERIDAS (DIGESTOR PRIMÁRIO)	6 – 16	2 – 5	50 – 60	0
LAMAS DIGERIDAS (DIGESTOR SECUNDÁRIO)	4,5 – 12	2,7 – 7	50 – 60	1,5 – 4

(*) volume de lamas / volume de águas residuais afluentes a ETAR

quadro 4 – Características das lamas nos órgãos destinados ao seu tratamento.

Atendendo a que a digestão anaeróbia não aquecida engloba apenas uma etapa de tratamento, as características das lamas digeridas produzidas neste processo de tratamento podem ser consideradas semelhantes às das lamas digeridas após passagem no digestor secundário.

3.4.3. Condicionamento Químico

O condicionamento químico consiste na adição de produtos químicos às lamas com o objectivo de quebrar as ligações eléctricas existentes entre as partículas sólidas coloidais e a "*bound water*", aumentando, assim, artificialmente, o tamanho das partículas sólidas e a percentagem de água livre existente nas lamas e facilitando, por isso, o processo de desidratação existente a jusante.

Os produtos químicos utilizados no condicionamento químico das lamas são idênticos aos utilizados nos processos de coagulação/floculação química e incluem a cal, o sulfato de alumínio, o cloreto férrico e os polímeros orgânicos.

No entanto, o condicionamento químico das lamas digeridas, realizado imediatamente a montante da sua desidratação mecânica, é, em geral, efectuado com recurso a polielectrólitos aniónicos. Efectivamente, estes polielectrólitos estão particularmente indicados para o condicionamento químico de lamas com um elevado teor em matéria orgânica.

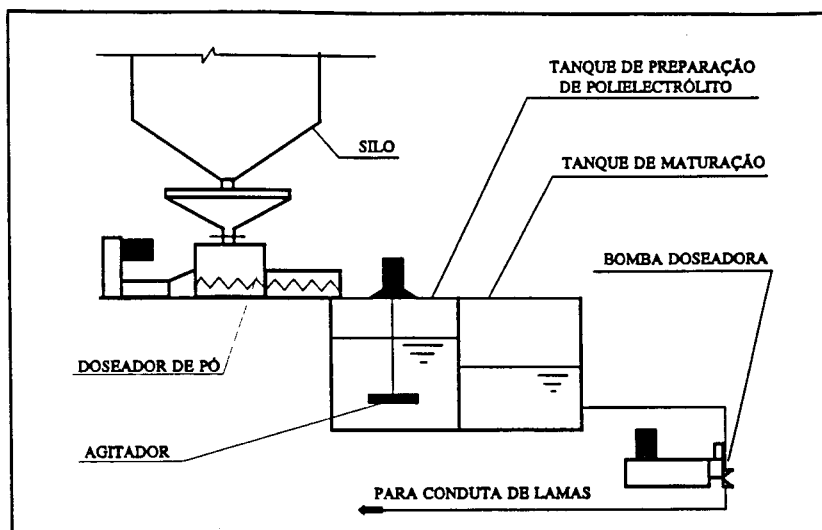
A dosagem de polielectrólito mais adequada deve ser objecto de testes laboratoriais, mas, na prática, varia, normalmente, entre 2 e 5 kg/ton de matéria seca. Embora os polielectrólitos se apresentem, em geral, no estado sólido e na forma de pós, devem ser diluídos em água antes da sua mistura com as lamas.

Na maior parte dos polielectrólitos existentes, a concentração óptima da solução que será adicionada às lamas é de cerca de 0,5%, sendo o processo de preparação da solução dividido em duas fases. A primeira corresponde à dissolução do pó no meio aquoso e a segunda à sua maturação até atingir as propriedades necessárias à sua utilização.

Após o processo de preparação descrito, a solução de polielectrólito é injectada por meio de bombas doseadoras, directamente na conduta de transporte das lamas do digestor secundário para os equipamentos de desidratação mecânica. O escoamento turbulento das lamas nas condutas é, por si só, suficiente para permitir uma rápida mistura do polielectrólito com as lamas e a consequente quebra das ligações eléctricas existentes entre as partículas sólidas coloidais e a água.

Em geral, a dosagem de um polielectrólito é suficiente para permitir um condicionamento químico adequado para as lamas. No entanto, em alguns casos, particularmente quando a percentagem de efluentes industriais é bastante significativa e as lamas são pouco fibrosas, convém adicionar, também, leite de cal para melhorar as suas características de desidratação.

Apresenta-se, na *figura 16*, um esquema típico de um processo de condicionamento químico de lamas.



*figura 16 – Esquema típico de um sistema de condicionamento químico de lamas
(adaptado de Degremont [19]).*

3.4.4. Desidratação

Independentemente do destino final previsto para as lamas, as estações de tratamento de águas residuais incluem, normalmente, uma etapa destinada à sua desidratação. Esta operação física de tratamento destina-se a reduzir o teor de humidade das lamas para valores da ordem dos 60 a 80%. Esta redução apresenta as seguintes vantagens principais:

- o volume global das lamas produzidas na ETAR é reduzido para valores 5 a 10 vezes inferiores;
- o armazenamento das lamas desidratadas é bastante facilitado porque este material, após a desidratação, passa a apresentar características equivalentes às dos materiais sólidos (assemelha-se a terra húmida);
- o transporte das lamas para os locais destinados ao seu destino final torna-se muito mais económico e fácil porque, para além dos volumes a transportar serem, comparativamente, muito menores, as características sólidas do produto permitem o seu transporte em melhores condições;
- existe uma maior facilidade e diversidade de soluções em termos do seu desembarçamento final.

Durante muitos anos a aplicação em leitos de secagem constituiu o método mais utilizado para proceder à desidratação das lamas produzidas nas ETAR's.

No entanto, a necessidade, por um lado, de ocupar grandes áreas, devido à grande lentidão do processo de secagem e à sua dependência das condições atmosféricas e, por outro, as exigências de protecção do meio ambiente progressivamente mais restritivas e a necessidade de reduzir os impactos ambientais negativos motivados pela construção das estações de tratamento, obrigam a minimizar as áreas reservadas ao tratamento, ao controlo das emissões de odores e da proliferação de insectos e roedores nessas áreas.

Estes factores têm reduzido o campo de aplicação do método de desidratação por leitos de secagem que, actualmente, se restringe apenas a algumas muito pequenas estações de tratamento.

Presentemente recorre-se a metodologias mais avançadas de desidratação de lamas que permitem concentrar esta operação em pavilhões com dimensões bastante diminutas e com a possibilidade de um controlo rigoroso das condições de funcionamento existentes. Assim, as metodologias mais utilizadas na desidratação das lamas são as seguintes:

- filtros de bandas;
- filtros prensa;
- centrífugas.

A selecção de um dos três processos de desidratação de lamas referidos passa, em primeiro lugar, por uma análise prévia de carácter técnico-económico.

Em geral, os filtros prensa são os equipamentos de desidratação menos utilizados em ETAR's convencionais, estando o seu uso mais generalizado na desidratação de lamas em sistemas de tratamento de água residuais industriais.

Por sua vez, os filtros de bandas têm uma utilização bastante generalizada desde as ETAR's de média até às de grande dimensão.

Por último, as centrífugas só muito recentemente surgiram competitivamente no mercado nacional, estando particularmente indicadas para a desidratação de grandes volumes de lamas e, por isso, para sistemas de tratamento que tenham uma produção de lamas suficiente para permitir o seu funcionamento em contínuo.

Em termos de capacidade de desidratação refere-se que, enquanto os filtros de bandas permitem a obtenção de uma lama com 20 a 25% de sólidos no máximo, este valor pode atingir cerca de 30% no caso dos filtros prensa e ir até 35 a 40% no caso das centrífugas. Para atingir estes valores é, no entanto, necessário prever um condicionamento químico prévio das lamas.

3.5. DESTINO FINAL DAS LAMAS

O destino final das lamas produzidas nas estações de tratamento de águas residuais é, geralmente, o problema de mais complexa resolução que as entidades responsáveis pela gestão dos sistemas de saneamento básico têm de enfrentar.

Na realidade, a solução para a deposição final das lamas ultrapassa, normalmente, a área de influência de um sistema de tratamento de águas residuais, devendo ser objecto de um planeamento mais vasto a nível regional ou, mesmo, inter-regional inserindo-se, muitas vezes, na problemática mais geral da eliminação de todos os resíduos sólidos aí produzidos.

Actualmente, a eliminação final dos resíduos sólidos e, em particular, das lamas, pode ser efectuada por deposição no solo ou por incineração. Com efeito, a deposição de lamas no mar, que foi durante décadas a principal solução existente nas zonas costeiras de países como o *Reino Unido* ou os *EUA*, é, hoje, totalmente interdita por força de diplomas legais que impedem a descarga de resíduos sólidos em águas marinhas.

A deposição das lamas no solo pode ser efectuada em aterros sanitários ou por aplicação em terrenos com utilização agrícola ou florestal de lamas líquidas, desidratadas ou sujeitas, previamente, a um processo de compostagem. Por sua vez, a eliminação final com recurso a centrais incineradoras permite a destruição quase total deste tipo de resíduos, resultando, apenas, como produtos finais do processo, as cinzas e os gases libertados para a atmosfera.

Em Portugal, as alternativas para o destino final das lamas com origem no tratamento de esgotos urbanos são, em geral, as correspondentes às várias hipóteses referidas para deposição em terra, embora seja possível prever, num futuro mais ou menos próximo, a possibilidade de incluir as lamas produzidas em algumas estações de tratamento em sistemas mais vastos de eliminação de resíduos com recurso à incineração.

A aplicação das lamas em aterros sanitários é um processo bastante utilizado embora não permita, ao contrário de outros processos, a sua valorização económica. As principais vantagens deste método, para além da possibilidade de deposição final conjunta com os resíduos sólidos urbanos, são a sua economia, tanto em termos de custos de primeiro investimento como de exploração, a grande rapidez e facilidade de implantação e a obtenção de resultados muito satisfatórios em termos sanitários e ambientais desde que a sua exploração seja realizada cuidadosamente.

Com efeito, a exploração de um aterro sanitário pressupõe a execução diária de uma série de tarefas que, se não forem convenientemente efectuadas, conduzem rapidamente à transformação desse aterro numa lixeira, com os consequentes prejuízos em termos ambientais.

Assumem particular importância na exploração de um aterro sanitário a compactação e a cobertura diária dos resíduos transportados com uma camada de terra com espessura conveniente, a correcta e eficaz drenagem, recolha e tratamento dos lixiviados de modo a evitar a contaminação das águas superficiais ou subterrâneas adjacentes ao aterro e o controlo rigoroso das suas condições de exploração de modo a limitar as emissões de biogás, que podem, em alguns casos, estar na origem de explosões e incêndios.

Concluindo, a utilização de aterros sanitários representa uma metodologia económica, eficaz e ambientalmente aceitável para o desembaraço conjunto das lamas e restantes resíduos sólidos urbanos desde que sejam respeitadas as disposições legais em vigor relativas à deposição de resíduos em aterros controlados.

Refere-se, por último, que embora estes sistemas ocupem áreas relativamente importantes, têm uma duração no tempo limitada pela sua capacidade de recepção de resíduos. Assim, após o esgotamento da capacidade de um determinado aterro sanitário, deve-se prever a recuperação dessa área em termos ambientais realizando, por exemplo, um adequado recobrimento vegetal.

Por sua vez, a aplicação de lamas em terrenos destinados à exploração agrícola ou florestal, constitui, também, um método correntemente utilizado para o desembaraço final das lamas. No entanto, esta solução deve ser objecto de um rigoroso controlo pois uma aplicação desregrada pode pôr em risco a saúde pública das populações devido, nomeadamente, à possível existência nas lamas de substâncias tóxicas ou perigosas e, também, de organismos patogénicos que podem afectar pessoas, animais e as próprias plantas.

Devem-se, por isso, respeitar escrupulosamente as directivas legais em vigor relativas à aplicação de lamas em solos agrícolas e, em particular, controlar frequentemente os valores das concentrações de metais pesados tanto nas lamas como nos solos onde estas são aplicadas e, por último, limitar as taxas de aplicação das lamas nos solos a valores compatíveis com as características específicas do solo e com as utilizações agrícolas previstas.

A aplicação de lamas nos solos representa uma assinalável rentabilização económica de um resíduo com poucas possibilidades de ser valorado. As principais vantagens associadas à aplicação de lamas em solos agrícolas ou florestais consistem na melhoria das suas potencialidades produtivas devido à incorporação de nutrientes que permitem reduzir o recurso a fertilizantes químicos e, por outro lado, a presença de uma quantidade bastante elevada de matéria orgânica que permite melhorar algumas características dos solos, nomeadamente, a sua capacidade de retenção de água, além de aumentar a actividade microbiológica existente.

No entanto, a aplicação de lamas em terrenos agrícolas ou florestais está sempre dependente da existência, nas proximidades da estação de tratamento, de explorações desta natureza em número e com dimensão suficiente para absorver toda a produção de lamas da ETAR. Por outro lado, este tipo de solução requer, em geral, a construção de locais para armazenagem das lamas pois a sua aplicação agrícola é, normalmente, do tipo sazonal.

Um processo mais seguro, eficaz e ambientalmente correcto de aplicação de lamas no solo consiste na sua compostagem prévia. A compostagem de lamas consiste na decomposição aeróbia da matéria orgânica por acção da população microbiana existente nas lamas.

O processo de compostagem pode ser realizado em conjunto com outros resíduos sólidos de natureza orgânica conduzindo à formação de um composto estável, com uma redução significativa dos sólidos voláteis, um baixo teor em organismos patogénicos, devido às elevadas temperaturas que ocorrem, naturalmente, durante o processo de estabilização aeróbia e características semelhantes a um húmus. Estas propriedades permitem considerar este produto como um correctivo orgânico bastante interessante em termos agrícolas e muito seguro em termos sanitários.

Pelos motivos anteriormente referidos, a compostagem é um método de valorização dos resíduos sólidos urbanos em grande expansão, existindo em Portugal exemplos recentes da utilização deste processo para a valorização deste tipo de resíduos que apresentam um assinalável sucesso comercial.

Por último, a incineração, ao contrário dos outros métodos referidos, constitui um processo de eliminação total das lamas. Este método consiste na combustão das lamas a uma temperatura de 800 a 1 000 °C destruindo a matéria orgânica existente e reduzindo-as, apenas, a um resíduo final constituído por cinzas

de natureza inorgânica e gases que são libertados para a atmosfera, após um adequado processo de descontaminação.

Quando se prevê uma eliminação final das lamas produzidas numa ETAR por um processo de incineração, deve-se evitar o recurso a operações de tratamento de lamas que reduzam a sua concentração em matéria orgânica. Efectivamente, a matéria orgânica tem um valor calorífico elevado permitindo uma redução significativa do consumo de energia na central incineradora.

Por este motivo, as lamas a incinerar deverão ser sempre lamas brutas, porque têm uma concentração muito elevada de matéria orgânica, mas desidratadas, porque os custos da operação de desidratação mecânica das lamas na ETAR são muito inferiores aos custos associados a evaporação dessa água durante o processo de incineração.

A incineração é o método de desembaraçamento final das lamas que apresenta maiores custos de primeiro investimento e de exploração, só se tornando uma solução competitiva quando for possível mobilizar grandes volumes de resíduos que garantam um funcionamento em contínuo da central. Recorre-se, por isso, normalmente, à incineração conjunta das lamas e dos resíduos sólidos urbanos numa central incineradora de âmbito regional destinada a centralizar a eliminação de todos os resíduos deste tipo produzidos em vários aglomerados populacionais.

Outra vantagem associada à utilização de centrais incineradoras, para além da eliminação quase completa dos resíduos sólidos, consiste na melhoria relativa das condições sanitárias, estéticas e ambientais em que se realiza o processo, por comparação com os outros métodos existentes.

Com efeito, a área necessária para implantar uma central incineradora é muito inferior à correspondente a um aterro sanitário ou a uma central de compostagem, o seu impacto estético é, também, consideravelmente menor e o único tipo de poluição resultante da utilização deste método consiste na emissão de gases para a atmosfera. No entanto, existem sistemas de tratamento bastante eficazes na lavagem e purificação dos gases emitidos, permitindo minimizar os riscos de contaminação atmosférica associados a este tipo de instalações.

Refere-se, ainda, a possibilidade apresentada por este sistema de valorizar economicamente as cinzas resultantes do processo de incineração aproveitando-as como matérias primas de base para a construção de materiais aplicáveis na indústria da construção civil.

Por último, em termos de aplicação prática dos sistemas anteriormente referidos, considera-se que os aterros sanitários e a aplicação directa das lamas desidratadas em terrenos com utilização agrícola ou florestal constituem, em princípio, as melhores opções para o destino final destes resíduos em aglomerados populacionais de pequena ou média dimensão localizados em zonas rurais com baixa densidade populacional.

Por sua vez, em aglomerados de pequena ou média dimensão localizados em zonas mais densamente urbanizadas e, por isso, produzindo, em conjunto, quantidades apreciáveis de resíduos, a opção mais correcta é, em princípio, por um sistema de compostagem de índole regional que permita resolver, de um modo

integrado, a problemática dos resíduos sólidos urbanos e das lamas aí produzidas, escoando o produto resultante para explorações agrícolas e florestais existentes num raio de acção relativamente próximo.

Finalmente, em grandes áreas metropolitanas e em regiões densamente urbanizadas, o recurso a uma central incineradora poderá constituir uma solução bastante atractiva e ambientalmente aceitável para resolver a problemática da eliminação final das grandes quantidades de resíduos aí produzidos.

4. REOLOGIA DAS LAMAS

4.1. INTRODUÇÃO

Embora os princípios fundamentais da física clássica sejam aplicáveis a qualquer tipo de material independentemente do seu estado físico, o estudo do comportamento mecânico dos corpos sólidos e das substâncias fluidas é realizado em dois ramos distintos da mecânica designados, respectivamente, por mecânica dos sólidos e mecânica dos fluidos. Esta separação justifica-se, sobretudo, pelas diferenças fundamentais existentes no comportamento destes materiais quando sujeitos a um determinado estado de tensão.

Nos corpos sólidos sujeitos a deformações elásticas, o valor da deformação é proporcional à intensidade da solicitação exterior aplicada, manifestando-se a elasticidade pela tendência que o corpo apresenta de voltar à sua configuração inicial após a cessação dessa solicitação.

Robert Hooke formulou os princípios básicos da moderna *Teoria da Elasticidade* que relaciona o estado de tensão e de deformação nos corpos sólidos sujeitos a deformações elásticas. Nestas condições, se o corpo sólido for homogêneo, isotrópico e estiver em equilíbrio sob a acção de um sistema de forças exteriores, as componentes do estado de deformação elástica, produzido pela aplicação no corpo das forças exteriores, são formas lineares das componentes do estado de tensão a que o corpo está submetido.

O factor de proporcionalidade entre as tensões e as deformações, nos casos em que existe elasticidade plana, designa-se por módulo de elasticidade do material podendo, então, aplicar-se a conhecida expressão da *Lei de Hooke*:

$$\tau = E \epsilon \quad (17)$$

Apresenta-se, na *figura 17*, um diagrama simplificado da relação existente num corpo sólido entre o estado de tensão e o de deformação, destacando-se a existência de duas fases distintas, a fase elástica e a fase plástica.

Numa primeira fase do processo de deformação, quando as solicitações aplicadas são bastante reduzidas, os corpos sólidos apresentam, em geral, características elásticas que podem ser traduzidas pelos princípios anteriormente mencionados.

No entanto, aumentando progressivamente a intensidade das solicitações, atinge-se um limite a partir do qual as deformações no corpo sólido passam a ser irreversíveis, cessando, assim, o campo de aplicação da *Teoria da Elasticidade* formulada por *Hooke*. Esta fase, designada por fase de deformação plástica do corpo sólido, caracteriza-se por um rápido aumento das deformações, para variações reduzidas das tensões aplicadas, até ser atingido o limite de resistência do material, que coincide com o instante em que ocorre a sua rotura.

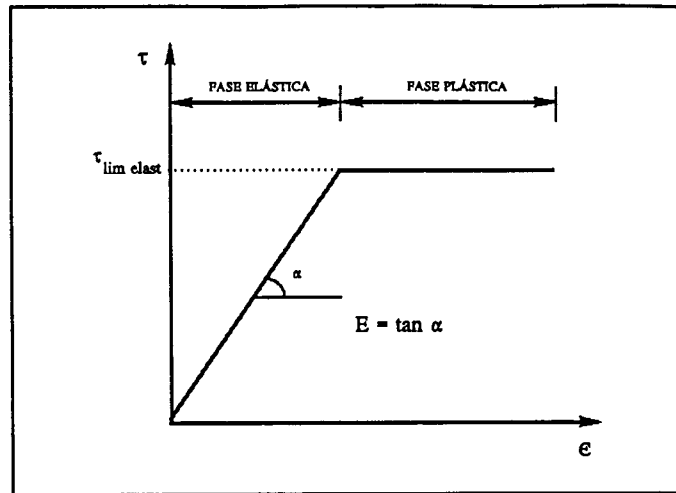


figura 17 – Diagrama representativo do comportamento mecânico de um corpo sólido.

Por sua vez, o estudo clássico do comportamento mecânico das substâncias fluidas, onde se incluem os líquidos e os gases, baseia-se em princípios totalmente distintos. Com efeito, as substâncias fluidas, ao contrário das sólidas, experimentam estados de deformação que aumentam indefinidamente, qualquer que seja o estado de tensão a que estão sujeitas.

A reologia é a ciência que estuda o comportamento mecânico das substâncias fluidas, classificando-o em função de parâmetros específicos apropriados à previsão das características que o seu escoamento em condições reais poderá ter.

Isaac Newton realizou a primeira análise teórica da relação entre o estado de tensão e o estado de deformação existente nas substâncias fluidas, tendo concluído que a resistência que um fluido oferece ao movimento é proporcional ao seu gradiente de velocidades. Na realidade, quando se analisa o comportamento mecânico de substâncias fluidas, não faz sentido utilizar o conceito de deformação, pois esta é infinita, devendo, antes, relacionar-se o estado de tensão com o estado da velocidade de deformação.

Designam-se, então, *Newtonianos*, os fluidos que apresentam uma relação linear entre a tensão e a variação espacial da velocidade, como é o caso, por exemplo, da água, ar, glicerina e, em geral, todos os fluidos que tenham um baixo peso molecular.

Posteriormente à sua formulação, os conceitos básicos da mecânica dos fluidos *Newtonianos* sofreram várias correcções.

Refere-se, em primeiro lugar, a introdução por *Prandtl* do conceito de camada limite, que restringiu a influência das tensões tangenciais de natureza viscosa aos movimentos com pequenas velocidades, ditos laminares, e, para velocidades maiores, nos escoamentos ditos turbulentos, a uma camada de pequena espessura adjacente às fronteiras sólidas do escoamento, que designou por camada limite. No exterior dessa camada limite as tensões desenvolvidas são, essencialmente, de natureza turbulenta podendo-se desprezar a influência da viscosidade.

Mais recentemente, e em grande parte devido ao desenvolvimento industrial a que se assistiu no decurso deste século, surgiu a necessidade de construir sistemas para transporte de substâncias fluidas cujos comportamentos mecânicos não são correctamente descritos a partir dos estudos de *Newton*. Estão nestas condições um grande número de fluidos que vão desde os polímeros, tintas, emulsões, gels, hidrocarbonetos, produtos alimentares e farmacêuticos, cimentos, pasta de papel até às lamas que são objecto da presente Dissertação.

Apesar de muitos destes fluidos apresentarem características muito diferentes quando submetidos a uma determinada tensão tangencial, foram, inicialmente, agrupados num mesmo grupo que tomou a designação genérica de fluidos não-*Newtonianos*. No entanto, o rápido desenvolvimento observado nas técnicas de análise e caracterização do comportamento reológico dos fluidos, permitiu distingui-los e estabelecer uma classificação mais exacta e objectiva.

Além disso, os avanços registados nas técnicas de medição das propriedades reológicas dos fluidos conduziram ao desenvolvimento de conceitos que, em alguns casos, tendem a eliminar a separação anteriormente existente entre os domínios clássicos da mecânica dos sólidos e da mecânica dos fluidos. Conhecem-se, hoje, substâncias líquidas que possuem algumas propriedades normalmente atribuídas aos corpos sólidos e vice-versa. Estas substâncias, quando sujeitas a um determinado estado de tensão, apresentam, simultaneamente, características elásticas e viscosas sendo o seu comportamento vulgarmente designado por viscoelástico.

Verifica-se, assim, que na natureza não existe uma linha bem definida de demarcação entre as matérias sólidas e fluidas mas, antes, um espectro contínuo de matérias com comportamentos distintos, posicionando-se os corpos sólidos e as substâncias fluidas, definidos de acordo com os conceitos clássicos, respectivamente, da mecânica dos sólidos e da mecânica dos fluidos *Newtonianos*, nos dois extremos desse espectro, mas existindo, entre essas extremidades, uma vasta zona intermédia ocupada por materiais com características mistas.

O principal objectivo da presente Dissertação consiste no estudo do escoamento das lamas produzidas em estações de tratamento de águas residuais. Estes fluidos têm características reológicas distintas das exibidas pelos fluidos *Newtonianos* e, por isso, o seu estudo insere-se no campo mais vasto do estudo dos fluidos não-*Newtonianos*.

As lamas são líquidos na medida em que se escoam quando sujeitas a um determinado estado de tensão, mas apresentam, também, características específicas dos corpos sólidos na medida, por exemplo, em que é necessário ultrapassar um determinado valor da tensão aplicada para se dar início ao escoamento. Segundo esta perspectiva, para tensões inferiores a esse limiar, as lamas comportam-se como sólidos, podendo sofrer deformações do tipo elástico ou plástico.

Compreende-se, assim, a importância que a reologia assume como ciência que estuda e permite caracterizar o comportamento dos materiais fluidos e, em particular, das lamas produzidas nas ETAR's.

4.2. CLASSIFICAÇÃO REOLÓGICA DOS FLUIDOS

4.2.1. Fluidos Newtonianos

Um fluido diz-se *Newtoniano* quando apresenta uma relação linear entre as tensões tangenciais aplicadas e as respectivas velocidades de deformação angular.

Considerando, então, o escoamento em regime laminar de uma massa fluida entre dois elementos de superfície planos, paralelos e distantes de um infinitésimo dr , movendo-se, respectivamente, com velocidades $\vec{v}$ e $\vec{v} + d\vec{v}$, de acordo com o esquema apresentado na *figura 18*, verifica-se que, quando o fluido é *Newtoniano*, o perfil de velocidades da massa fluida é linear e, conseqüentemente, o gradiente de velocidades na normal comum às duas superfícies, $d\vec{v}/dr$, é, numericamente, igual à velocidade de deformação angular, $d\alpha/dt$.

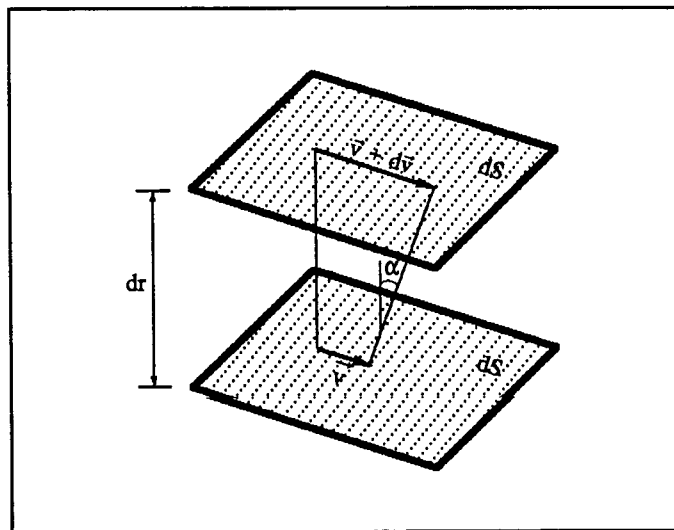


figura 18 – Escoamento de um fluido Newtoniano, em regime laminar, entre dois elementos de superfície planos e paralelos (adaptado de Novais-Barbosa [60]).

Newton verificou, experimentalmente, que, no escoamento referido, o elemento de superfície que se move com uma velocidade maior, tende a arrastar o outro com uma força tangencial proporcional à área dS , e ao gradiente de velocidades segundo a normal $d\vec{v}/dr$, cuja intensidade poderá ser dada pela seguinte expressão:

$$dF = \mu \, dS \, \frac{dv}{dr} \quad (18)$$

ou, ainda, numa expressão mais frequentemente utilizada:

$$\tau = \mu \, \frac{dv}{dr} \quad (19)$$

4.2.2. Fluidos não-Newtonianos

Consideram-se como fluidos não-Newtonianos todos os fluidos que não apresentam, a uma dada temperatura e pressão, uma relação linear entre a tensão tangencial, τ , e a velocidade de deformação angular, $\dot{\gamma}$.

Devido à grande diversidade de características reológicas exibidas por estes fluidos, considera-se conveniente sub-dividir o seu estudo em três grupos distintos designados, respectivamente, por:

- Fluidos não-Newtonianos com características reológicas independentes do tempo;
- Fluidos não-Newtonianos com características reológicas dependentes do tempo;
- Fluidos viscoelásticos.

Consideram-se fluidos não-Newtonianos com características reológicas independentes do tempo, os fluidos que, quando em movimento, apresentam uma velocidade de deformação angular função, apenas, do valor da tensão tangencial aplicada nesse instante.

Pelo contrário, nos fluidos não-Newtonianos cujas características reológicas são dependentes do tempo, a velocidade de deformação angular não é, apenas, função do valor da tensão tangencial aplicada, mas, também, do tempo durante o qual essa tensão é aplicada e, mesmo, das tensões a que o fluido esteve, anteriormente, sujeito.

Por último, consideram-se viscoelásticos os fluidos que apresentam uma recuperação parcial elástica quando cessa a aplicação da tensão tangencial a que estão submetidos. Estes materiais possuem, por isso, características mistas entre os fluidos e os sólidos.

4.2.2.1. Fluidos Não-Newtonianos com Características Reológicas Independentes do Tempo

Os fluidos não-Newtonianos com características reológicas independentes do tempo são, também, designados por fluidos viscosos não-Newtonianos. Esta designação justifica-se porque, nestes fluidos, tal como nos Newtonianos, as tensões desenvolvidas em movimento laminar são exclusivamente de natureza viscosa.

Na *figura 19* apresentam-se os diagramas reológicos típicos dos fluidos Newtonianos e dos fluidos não-Newtonianos com características reológicas independentes do tempo.

A análise dos diagramas reológicos apresentados na *figura 19* permite, desde logo, estabelecer uma primeira divisão entre os fluidos que apresentam uma determinada tensão de cedência e aqueles que não apresentam essa tensão.

Define-se tensão de cedência como a tensão abaixo da qual a substância se comporta como se fosse um corpo sólido mas, quando essa tensão é ultrapassada, passa a escoar-se como um líquido.

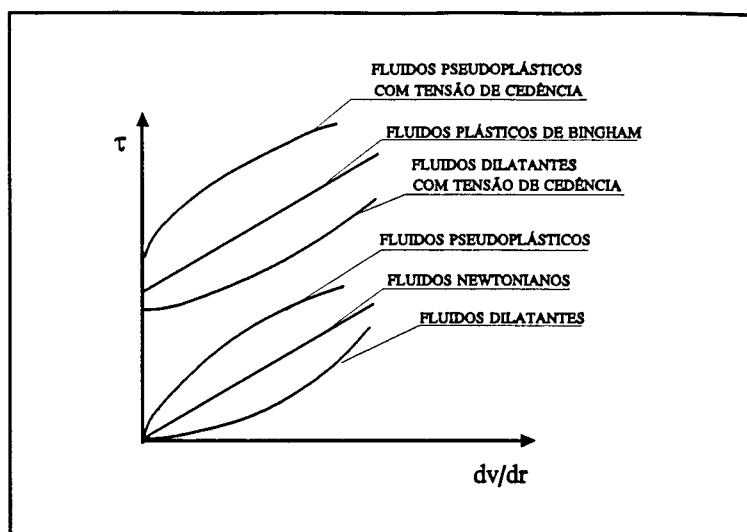


figura 19 – Diagramas reológicos típicos dos fluidos com características reológicas independentes do tempo.

4.2.2.1.1. Fluidos com Tensão de Cedência

A *tensão de cedência* é uma característica que pode existir tanto em fluidos inelásticos como em fluidos viscoelásticos. Por este motivo, as substâncias cujo comportamento reológico apresenta uma determinada tensão de cedência são, normalmente, conhecidas como viscoplásticas.

O conceito da tensão de cedência sofreu, recentemente, uma evolução significativa que motivou, mesmo, a publicação de alguns trabalhos onde se põe em causa a sua existência real.

Efectivamente, o recente desenvolvimento de equipamentos mais sofisticados para medida dos parâmetros reológicos e, sobretudo, a sensibilidade atingida nas medições a muito pequenas velocidades de deformação angular, permitiu ampliar a gama de medição dos comportamentos reológicos dos fluidos a zonas anteriormente inatingíveis confirmando, assim, experimentalmente, comportamentos reológicos para estados de tensão e de velocidade de deformação que, anteriormente, só podiam ser obtidos por extrapolação com base nas medições efectuadas na gama disponível.

Barnes et al [7] realizaram várias experiências com fluidos considerados viscoplásticos tendo concluído que, para pequenas tensões tangenciais, as suas viscosidades, embora elevadas, são sempre finitas não sendo, por isso, legítimo atribuir a estes fluidos uma determinada tensão de cedência.

Não é possível, no entanto, generalizar esta afirmação a todos os fluidos existentes com tensão de cedência e, pelo contrário, estudos posteriores demonstraram inequivocamente que, para alguns fluidos e, em particular, para algumas suspensões, a viscosidade converge para infinito para um determinado valor da tensão tangencial que é designado por tensão de cedência.

Referem-se os resultados experimentais obtidos por *Jones et al* [38] para uma suspensão de partículas sólidas esféricas em água, onde se confirma a ocorrência de tensão de cedência acima de uma determinada concentração em sólidos.

Apesar da elevada precisão atingida pelos equipamentos actualmente disponíveis e destinados a medir as características reológicas dos fluidos, as medições efectuadas na gama das muito baixas velocidades de deformação angular (ou das tensões tangenciais), são muito afectadas por interferências dos equipamentos de medida e pelas técnicas de medição utilizadas. Em particular, fenómenos como o deslizamento junto às fronteiras sólidas, devidos à migração das partículas para zonas mais afastadas dessas superfícies, podem estar na origem da formação de um gradiente de concentrações de sólidos que modifica bastante os resultados das medições efectuadas.

Para minimizar a grande incerteza associada à determinação da tensão de cedência nos fluidos, desenvolveram-se recentemente várias técnicas específicas de medição que permitem reduzir, em grande medida, as principais causas de erro conhecidas. Essas técnicas são descritas mais adiante, em 4.4.6..

No entanto, é possível afirmar, desde já, que os modelos normalmente propostos para descrever o comportamento dos fluidos com tensão de cedência, representam uma simplificação muito útil nas aplicações práticas mas não correspondem à realidade.

Com efeito, é pouco provável que ocorra uma passagem súbita de um comportamento típico de um sólido para outro típico de um líquido, sendo, pelo contrário, mais provável que a estrutura interna do fluido sofra uma transformação gradual deformando-se progressivamente até atingir a rotura total, a partir da qual o escoamento pode ser considerado totalmente viscoso.

Deste modo, a consideração de duas tensões de cedência, uma máxima e outra mínima, poderá representar melhor o comportamento deste tipo de materiais. A tensão de cedência máxima, corresponderá, assim, à tensão de transição entre um comportamento plástico e um comportamento viscoso enquanto que a tensão de cedência mínima corresponderá à transição entre um comportamento elástico e um comportamento plástico.

Independentemente das considerações anteriormente efectuadas sobre a validade ou não da existência de uma tensão de cedência nos fluidos e, mesmo, sobre a precisão com que este parâmetro é determinado, verifica-se que existe um grande número de fluidos cujas características reológicas se adaptam bem aos modelos existentes para caracterizar os fluidos com tensão de cedência e, também, que a aplicação desses modelos à previsão das características do seu escoamento conduz a resultados muito precisos.

Existe uma grande quantidade de modelos matemáticos que procuram relacionar a tensão tangencial com a velocidade de deformação angular em fluidos viscoplásticos. As equações propostas nesses modelos para descrever o comportamento reológico deste tipo de fluidos baseiam-se, em geral, nas seguintes hipóteses:

$$1) \quad \forall \tau < \tau_c, \quad \frac{dv}{dr} = 0 \quad (20)$$

$$2) \quad \forall \tau \geq \tau_c, \quad \tau = \tau_c + f\left(\frac{dv}{dr}\right) \quad (21)$$

O modelo matemático mais simples capaz de descrever o comportamento reológico de alguns fluidos viscoplásticos é o *modelo plástico de Bingham*, ou, simplesmente, *modelo de Bingham*.

Este modelo, representado esquematicamente na *figura 19*, admite a existência de uma relação linear entre a tensão tangencial e a velocidade de deformação angular, para valores da tensão tangencial aplicada ao fluido superiores aos da sua tensão de cedência sendo, por isso, descrito pela seguinte equação:

$$\tau = \tau_c + \eta_B \frac{dv}{dr} \quad (22)$$

Os fluidos de *Bingham* apresentam, assim, bastantes analogias com os fluidos *Newtonianos*, correspondendo o seu comportamento reológico ao caso ideal de um material sólido cuja resistência interna à deformação sofre um colapso total instantâneo para um valor da tensão tangencial aplicada igual à sua tensão de cedência passando, em seguida, a comportar-se como um fluido com viscosidade constante.

Muitas vezes, não é possível descrever o comportamento reológico dos fluidos viscoplásticos com base num modelo tão simplista como o que é proposto por *Bingham*.

Com efeito, existem fluidos onde a relação entre a tensão tangencial e a velocidade de deformação angular só converge para uma relação linear quando as tensões tangenciais aplicadas são já muito superiores à sua tensão de cedência. Este comportamento justifica-se pela existência de uma estrutura interna no fluido que não sofre um colapso instantâneo quando se atinge a tensão de cedência mas, pelo contrário, vai cedendo gradualmente.

Os fluidos viscoplásticos que apresentam um comportamento reológico não linear podem ser classificados em dois grupos, os fluidos pseudoplásticos com tensão de cedência e os fluidos dilatantes com tensão de cedência. Na, já referida, *figura 19* apresenta-se, também, uma representação gráfica dos comportamentos reológicos destes fluidos.

O modelo matemático mais utilizado para descrever o comportamento reológico destes fluidos é o *modelo de Herschel-Bulkley*. Neste modelo, a relação entre a tensão tangencial e a velocidade de deformação angular é dada pela seguinte equação:

$$\tau = \tau_c + K \left(\frac{dv}{dr} \right)^n \quad (23)$$

O índice de potência, n , confere um carácter não linear à relação entre as tensões tangenciais e as velocidades de deformação angular. Assim, quando $n < 1$, os fluidos são do tipo pseudoplástico com tensão de

cedência e, por sua vez, quando $n > 1$, os fluidos são do tipo dilatante com tensão de cedência. Para $n = 1$, o comportamento reológico do fluido é idêntico ao proposto no *modelo de Bingham*, sendo, neste caso, $K = \eta_B$.

Concluindo, o *modelo de Herschel–Bulkley* pode ser considerado como uma generalização do modelo proposto por *Bingham*, possibilitando a sua aplicação a todos os fluidos que apresentem características viscoplásticas. No entanto, a necessidade de quantificar três parâmetros reológicos (τ_c , K e n) dificulta bastante a sua aplicação prática, pois exige a aplicação de métodos de cálculo bastante morosos.

Presentemente, este obstáculo à sua utilização pode considerar-se ultrapassado, pois existe já "software" específico para realizar, automaticamente, os cálculos matemáticos necessários em função do modelo reológico pretendido.

Outro modelo bastante utilizado para descrever o comportamento reológico dos fluidos com tensão de cedência é o *modelo de Casson*. Este modelo, descrito pela equação:

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_c} + \sqrt{\eta_{\infty} \frac{dv}{dr}} \quad , \quad (24)$$

representa o comportamento reológico de um fluido cuja relação entre os valores da raiz quadrada da tensão tangencial e da velocidade de deformação angular é linear.

Este modelo admite, assim, o princípio da não linearidade entre os valores da tensão e da velocidade de deformação angular mas considera que, para valores muito elevados da tensão tangencial aplicada, o valor da viscosidade converge para um valor limite, constante, designado por η_{∞} , que representa o valor da viscosidade após a rotura completa da estrutura interna existente no fluido.

O *modelo de Casson* tem uma aplicação prática bastante mais simples que o *modelo de Herschel–Bulkley*, pois exige, apenas, a quantificação de dois parâmetros reológicos. No entanto, o seu campo de aplicação prático não é tão generalizado e, além disso, verifica-se que a linearidade entre a raiz quadrada da tensão tangencial e da velocidade de deformação angular, ocorre, apenas, quando as tensões aplicadas são já muito elevadas.

4.2.2.1.2. Fluidos sem Tensão de Cedência

Designam-se por *fluidos não-Newtonianos sem tensão de cedência*, os fluidos que se escoam, qualquer que seja o valor da tensão tangencial aplicada, mas que não apresentam uma relação linear entre a tensão tangencial e a respectiva velocidade de deformação angular.

Também para estes fluidos, existem muitos modelos empíricos e teóricos disponíveis para descrever o seu comportamento reológico. No entanto, o modelo que melhor se adapta às relações normalmente existentes entre as tensões tangenciais e as velocidades de deformação angular, independentemente do seu valor, é o *modelo de Ostwald–de Waele*, vulgarmente designado por *lei de potência*, cuja representação matemática é efectuada pela seguinte equação:

$$\tau = K \left(\frac{dv}{dr} \right)^n \quad (25)$$

A *lei de potência* pode ser graficamente traduzida pelas curvas da *figura 19*, que representam, respectivamente, os comportamentos reológicos dos fluidos pseudoplásticos ($n < 1$) e dilatantes ($n > 1$). Os fluidos *Newtonianos* podem, também, ser englobados neste modelo pois constituem um caso particular da *lei de potência*, quando $n=1$.

A maior parte dos *fluidos não-Newtonianos sem tensão de cedência* apresenta um comportamento reológico do tipo pseudoplástico. Este tipo de comportamento caracteriza-se por uma diminuição progressiva do valor instantâneo da viscosidade do fluido à medida que o valor da tensão tangencial a que este está sujeito aumenta.

Uma possível interpretação física para este tipo de comportamento, baseia-se na progressiva desagregação existente ao nível das moléculas (ou partículas) existentes no fluido quando sujeitas a forças tangenciais com intensidade crescente. O efeito destas forças conduz a um progressivo ordenamento dessas moléculas (ou partículas) segundo direcções paralelas às do escoamento reduzindo, assim, a sua interacção e, consequentemente, a resistência do fluido ao escoamento, ou seja, a sua viscosidade instantânea.

Verifica-se, também, nos fluidos pseudoplásticos, que, quando o valor da tensão tangencial é bastante elevado, a viscosidade converge, em geral, para um valor mínimo. Esse valor mínimo corresponde ao valor da viscosidade a partir do momento em que se atingiu uma orientação completa das moléculas (ou partículas) segundo a direcção do escoamento. Nas representações gráficas do comportamento reológico dos fluidos este facto é confirmado pela linearidade exibida pelo diagrama reológico a partir de um determinado valor da tensão tangencial aplicada.

Uma situação inversa da anteriormente descrita, ocorre quando se trata de fluidos dilatantes. Efectivamente, estes fluidos apresentam um aumento progressivo da viscosidade quando estão sujeitos a valores sucessivamente maiores da tensão tangencial aplicada.

Na prática, a ocorrência de características reológicas dilatantes não é muito frequente mas pode ocorrer em suspensões sendo, normalmente, dependente da curva granulométrica e da forma das partículas sólidas que as constituem.

Verifica-se, também, que uma suspensão de um determinado material sólido pode apresentar comportamentos reológicos distintos em função da concentração em sólidos existente. Assim, uma suspensão que apresente um comportamento reológico dilatante com uma determinada concentração em sólidos, pode ter características pseudoplásticas para concentrações inferiores e ser do tipo pseudoplástico com tensão de cedência para concentrações em sólidos superiores.

4.2.2.2. Fluidos Não-Newtonianos com Características Reológicas Dependentes do Tempo

Por analogia com a classificação estabelecida para os fluidos não-Newtonianos com características reológicas independentes do tempo, também os fluidos não-Newtonianos com características reológicas dependentes do tempo podem ser classificados em dois grupos distintos designados, respectivamente, por fluidos tixotrópicos e fluidos anti-tixotrópicos, em função do seu comportamento quando sujeitos a uma determinada tensão tangencial durante um certo intervalo de tempo.

Os fluidos tixotrópicos revelam a tendência para aumentar o valor da sua velocidade de deformação angular quando sujeitos, durante algum tempo, a uma determinada tensão tangencial, enquanto que, pelo contrário, os fluidos anti-tixotrópicos, nas mesmas condições, revelam a tendência para diminuir o correspondente valor da sua velocidade de deformação angular.

Nestas condições, os diagramas definidores do comportamento reológico destes fluidos não podem ser representados por curvas função, apenas, das tensões tangenciais aplicadas e das respectivas velocidades de deformação angular, mas deverão incluir, também, a componente associada à variação temporal destas variáveis.

Na prática, verifica-se que a variação dos valores da velocidade de deformação angular, ao longo do tempo, num fluido sujeito a uma determinada tensão tangencial, não é constante mas, pelo contrário, converge para um determinado valor limite máximo ou mínimo em função, respectivamente, da natureza tixotrópica ou anti-tixotrópica do fluido.

Este fenómeno poderá, em certa medida, ser comparável ao efeito de *Bauschinger* exibido por alguns materiais sólidos quando sujeitos a operações repetidas de carga e descarga. Neste caso, ao fim de um determinado número de operações, ocorre um fenómeno de acomodação ou adaptação do material, tendendo os ciclos de histerese a estabilizar-se até ser atingido, no limite, um ciclo de acomodação invariável qualquer que seja o número subsequente de repetições efectuadas.

Apresentam-se, na *figura 20*, os diagramas reológicos típicos destes fluidos.

A aplicação de um modelo matemático a fluidos com características reológicas dependentes do tempo é uma tarefa bastante difícil e complexa pois obriga a relacionar os parâmetros reológicos tradicionalmente utilizados com a variável tempo.

No entanto, apesar do grau de fiabilidade conseguido ser bastante inferior ao dos modelos anteriormente descritos para os fluidos com comportamento reológico independente do tempo, existem alguns modelos para descrever o comportamento de fluidos tixotrópicos.

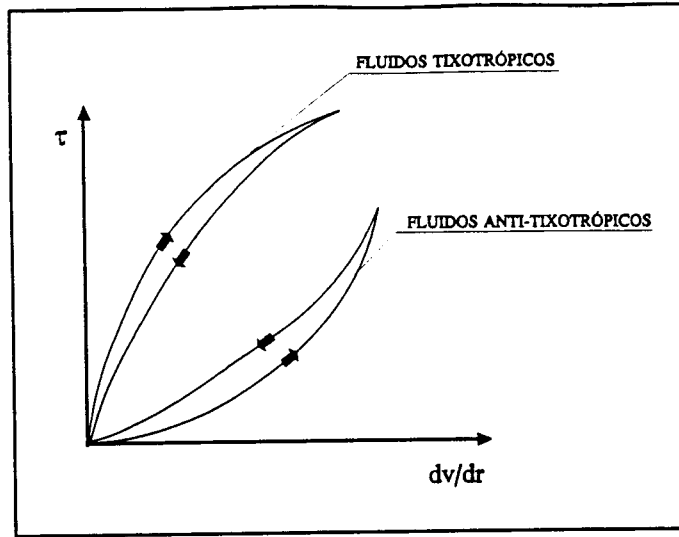


figura 20 – Diagramas reológicos típicos dos fluidos não-Newtonianos com características reológicas dependentes do tempo.

Refere-se, devido à sua relativa facilidade de aplicação, o modelo de Ritter-Govier.

Este modelo considera que o colapso da estrutura fluida, que está na origem da dependência das componentes reológicas do parâmetro tempo, pode ser caracterizado pela seguinte expressão:

$$\tau = \tau_v + \tau_e \quad (26)$$

Considera-se, assim, que a tensão tangencial a que o fluido está sujeito pode ser decomposta em duas componentes sendo uma constante, considerada como uma componente viscosa do fluido, e outra variável, função do estado de colapso verificado na estrutura interna do fluido.

Assim, para um dado valor da velocidade de deformação angular, a tensão estrutural variará entre um valor máximo e um mínimo correspondendo, o primeiro, à tensão estrutural imediatamente após o início dessa velocidade de deformação e, o segundo, ao valor dessa tensão após um tempo de actuação dessa velocidade de deformação considerado infinito, isto é, quando se verifica uma estabilização do comportamento reológico do fluido.

Nestas condições, o modelo de Ritter-Govier considera que a tensão estrutural existente no fluido, num dado instante, é função das suas tensões estruturais limites e pode ser dada pela seguinte equação:

$$\log \left(\frac{\tau_{e_1} - \tau_{e_\infty}}{\tau_{e_0}^2 - \tau_{e_1}} \right) = -K_D \left(\frac{\tau_{e_0} + \tau_{e_\infty}}{\tau_{e_0} - \tau_{e_\infty}} \right) \log t - \log K_{DR} \quad (27)$$

em que K_D é uma constante independente da velocidade de deformação angular, mas característica do fluido

e, por sua vez, K_{DR} é uma medida adimensional da evolução do processo de colapso estrutural do fluido e pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$K_{DR} = \frac{\tau_{e_0}^2 - \tau_{e_1} \tau_{e_{\infty}}}{\tau_{e_1} \tau_{e_{\infty}} - \tau_{e_{\infty}}^2} \quad (28)$$

No caso mais geral, a existência de um comportamento reológico no fluido do tipo pseudoplástico com tensão de cedência nos instantes inicial e final do processo de colapso estrutural pode ser traduzido, respectivamente, pelas equações:

$$\tau_0 = \tau_{c_0} + K_0 \left(\frac{dv}{dr} \right)^{n_0} \quad (29)$$

e

$$\tau_{\infty} = \tau_{c_{\infty}} + K_{\infty} \left(\frac{dv}{dr} \right)^{n_{\infty}}, \quad (30)$$

É, assim, possível descrever, totalmente, o comportamento reológico do fluido, ao longo de todo o processo de colapso estrutural que lhe confere as características tixotrópicas.

4.2.2.3. Fluidos Viscoelásticos

Denominam-se *viscoelásticos* os fluidos que apresentam, em simultâneo, propriedades elásticas e viscosas. Por este motivo, o comportamento reológico destes materiais não pode ser caracterizado, apenas, por uma relação entre a tensão tangencial e a velocidade de deformação angular mas deve incluir, também, outros parâmetros destinados a caracterizar o seu comportamento elástico e a sua dependência em relação ao tempo.

Os modelos físicos existentes, nomeadamente o *modelo de Oldroyd* e o *modelo de White-Metzner*, são pouco utilizados devido à sua complexidade em termos de formulação matemática mas, também, pela dificuldade em quantificar as constantes existentes e pela limitada gama de tensões onde podem ser aplicados.

A caracterização do comportamento reológico dos fluidos viscoelásticos com recurso a modelos mecânicos constitui, muitas vezes, uma alternativa possível para ultrapassar algumas das dificuldades anteriormente referidas.

Estes modelos permitem interpretar as relações existentes entre as tensões tangenciais, as velocidades de deformação angular e a deformação elástica do fluido com base em analogias mecânicas onde as componentes elástica e viscosa são representadas, respectivamente, por molas e êmbolos associados de forma a simular, mecanicamente, o seu comportamento reológico.

O *modelo de Maxwell* e o *modelo de Voigt* são os modelos mecânicos mais simples normalmente utilizados para representar o comportamento reológico dos fluidos viscoelásticos.

Apresenta-se, na *figura 21*, uma interpretação gráfica destes modelos.

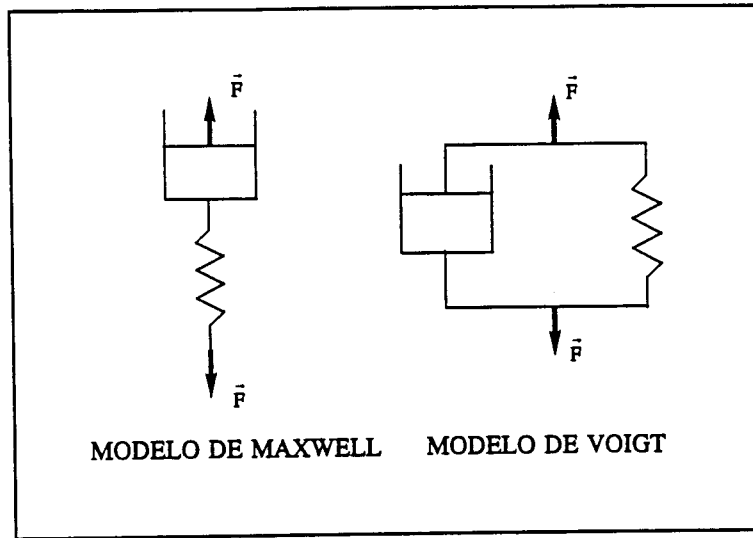


figura 21 – Interpretação gráfica dos modelos mecânicos de Maxwell e de Voigt.

O *modelo de Maxwell* associa uma mola e um êmbolo em série. Neste modelo, a deformação do corpo é igual ao somatório das deformações sofridas pela mola e pelo êmbolo que podem ser relacionadas com a intensidade da força aplicada do seguinte modo:

$$F = k x_{elast} , \quad (31)$$

para a mola, e

$$F = \mu \frac{dx_{visc}}{dt} . \quad (32)$$

para o êmbolo.

O movimento do corpo de *Maxwell* pode ser, assim, mecanicamente, caracterizado pela seguinte equação:

$$F = \mu \frac{dx_{total}}{dt} - \frac{\mu}{k} \frac{dF}{dt} \quad (33)$$

A analogia pretendida entre o corpo de *Maxwell* e um fluido viscoplástico é materializada pela equivalência existente entre a força e a deformação do corpo e, respectivamente, a tensão tangencial e a deformação angular do fluido viscoelástico. Substituindo estas variáveis na equação (33) obtém-se, finalmente, a equação caracterizadora do comportamento reológico dos fluidos viscoelásticos:

$$\tau = \mu \frac{d\alpha}{dt} - \frac{\mu}{k} \frac{d\tau}{dt} \quad (34)$$

Este modelo confere uma predominância exagerada à componente viscosa do movimento pois, qualquer que seja o valor da tensão aplicada, existe sempre escoamento do fluido.

Para anular este inconveniente, *Voigt* formulou outro modelo, denominado por *modelo de Voigt*, onde se procura aumentar a influência da componente elástica do material. Neste modelo, as deformações da mola e do êmbolo são iguais entre si e, por sua vez, iguais à deformação total do corpo.

Assim, seguindo uma metodologia idêntica à exposta anteriormente, conclui-se que o movimento deste corpo pode ser traduzido, mecanicamente, da seguinte forma:

$$F = k x_{total} + \mu \frac{dx}{dt} \quad (35)$$

e estabelecendo, também neste caso, uma analogia entre o corpo e um fluido viscoelástico, o comportamento reológico do fluido poderá ser definido pela seguinte equação:

$$\tau = k \alpha + \mu \frac{d\alpha}{dt} \quad (36)$$

Nas aplicações práticas, devido às complexidades existentes na consideração da influência dos parâmetros elásticos, a caracterização do escoamento de fluidos deste tipo é muitas vezes efectuada admitindo-se o fluido como simplesmente viscoso. Este procedimento considera-se razoável para escoamentos em regime laminar mas poderá conduzir a erros de cálculo significativos quando o regime do escoamento é turbulento, em particular, quando existem flutuações bruscas dos valores das tensões tangenciais.

4.3. REOLOGIA DAS SUSPENSÕES

O escoamento de fluidos multifásicos do tipo sólido-líquido é muito dependente do comportamento exibido pela sua fase sólida e, em particular, pela maior ou menor tendência que as partículas sólidas têm para sedimentar separando-se, assim, do meio líquido envolvente.

Com base nas características das partículas sólidas existentes nos fluidos multifásicos, nomeadamente, em função da sua curva granulométrica, forma, dimensões e densidade, é possível classificar os respectivos escoamentos do seguinte modo:

- escoamentos homogéneos;
- escoamentos pseudo-homogéneos;
- escoamentos heterogéneos.

Consideram-se homogéneos todos os escoamentos de fluidos monofásicos e de suspensões de partículas coloidais ($\phi \leq 1 \mu m$). Por sua vez, consideram-se pseudo-homogéneos os escoamentos de fluidos multifásicos que apresentam, em qualquer secção transversal, uma distribuição aproximadamente uniforme das partículas sólidas.

O escoamento das lamas produzidas nas estações de tratamento apresenta um comportamento semelhante a este podendo, por isso, considerar-se pseudo-homogéneo.

Por último, os escoamentos heterogêneos são escoamentos de fluidos multifásicos cujas partículas sólidas apresentam uma grande tendência para sedimentar. Verifica-se, assim, uma separação significativa entre a fase sólida e a fase líquida dando origem a uma estratificação do escoamento. Esta estratificação é materializada pela existência de um gradiente de concentrações em sólidos que evolui desde um valor máximo na zona inferior do escoamento, até um mínimo na zona superior.

Apresenta-se, na *figura 22*, uma representação esquemática dos escoamentos pseudo-homogêneos e heterogêneos de fluidos multifásicos em condutas sob pressão.

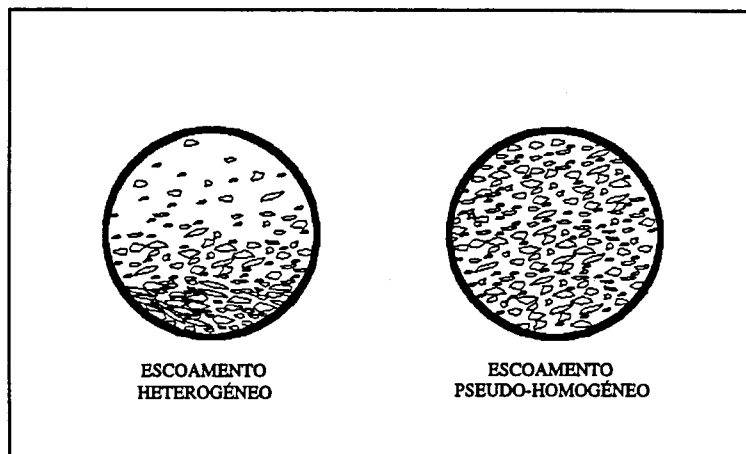


figura 22 - Representação esquemática dos escoamentos pseudo-homogêneos e heterogêneos.

Consideram-se suspensões os fluidos multifásicos cujo escoamento pode ser caracterizado como pseudo-homogêneo. As suspensões podem ser, assim, macroscopicamente consideradas como fluidos homogêneos e, conseqüentemente, o estudo do seu comportamento reológico e hidrodinâmico é idêntico ao realizado para líquidos.

No estudo das suspensões, a grandeza mais utilizada para quantificar o material sólido existente é a fracção sólida que é definida pela seguinte equação:

$$\Phi = \frac{\text{Volume ocupado pelas partículas}}{\text{Volume total da suspensão}} \quad (37)$$

Nas lamas produzidas em ETAR's, a fracção sólida é uma grandeza de difícil quantificação devido à existência de grandes quantidades de água adsorvida na superfície das partículas sólidas. A quantificação do volume ocupado por esta água, designada por "*bound water*", é uma tarefa de realização extraordinariamente difícil devido à natureza das forças envolvidas que dificultam muito a sua separação das partículas sólidas.

Por este motivo, as lamas são caracterizadas, normalmente, pela sua concentração em sólidos traduzindo esta grandeza a relação existente entre a massa das partículas sólidas e a massa total das lamas.

No entanto, a determinação da concentração em sólidos de uma lama não é, por si só, suficiente para caracterizar, convenientemente, o comportamento reológico das lamas pois as forças que condicionam esse

comportamento são, sobretudo, de natureza superficial e, conseqüentemente, independentes da densidade das partículas sólidas.

O comportamento reológico das suspensões pode, em princípio, ser descrito por um dos vários modelos reológicos descritos em 4.2.. Importa, no entanto, realizar uma análise específica, mais pormenorizada, da reologia das suspensões e, em particular, das alterações ao seu comportamento reológico motivadas pela presença de partículas sólidas, pois esta análise poderá ajudar a interpretar muitos dos fenómenos observados nos estudos reológicos das lamas produzidas nas ETAR's.

Considere-se, então, uma partícula sólida em suspensão num meio líquido. Esta partícula poderá estar, no caso mais geral, sujeita às seguintes acções:

- **forças eléctricas de repulsão entre as partículas**, associadas à existência de cargas eléctricas superficiais com o mesmo sinal nas partículas sólidas. Estas forças estão na origem da dispersão das partículas no meio fluido;
- **forças eléctricas de atracção entre as partículas**, ou forças de *London-van der Waals*, são forças de pequena intensidade que existem, sempre, entre partículas e que contribuem para a floculação das partículas sólidas;
- **forças Brownianas**, associadas à agitação molecular de origem térmica. Estas forças provocam uma agitação nas partículas coloidais ($\phi < 1,0 \mu\text{m}$), mantendo-as permanentemente em movimento e impedindo, assim, a sua sedimentação. Estas acções consideram-se desprezáveis em partículas de dimensão superior à coloidal.
- **forças hidrodinâmicas**, de natureza viscosa, devidas à diferença de velocidades existente a nível local entre as partículas sólidas e o meio fluido envolvente.

O comportamento reológico das suspensões, é, assim, dependente da importância relativa que estas forças assumem durante o escoamento das suspensões mas, também, da existência de outras interacções entre as partículas sólidas e, mesmo, entre as partículas sólidas e o meio líquido envolvente, nomeadamente:

- existência de "*bound water*";
- existência de ligações entre as partículas sólidas por meio de polímeros;
- interferências mecânicas entre as partículas devido aos movimentos a que estão sujeitas;
- ocorrência de fracturação mecânica das partículas sólidas por acção das forças tangenciais aplicadas.

Um aspecto normalmente pouco analisado na análise do comportamento reológico das suspensões, diz respeito ao comportamento reológico da sua fase líquida. Efectivamente, admite-se, em geral, que a fase líquida das suspensões apresenta um comportamento reológico do tipo *Newtoniano*.

Embora esta simplificação possa ser considerada abusiva para algumas suspensões, considera-se razoável admitir que a fase líquida das lamas produzidas nas ETAR's apresenta um comportamento *Newtoniano* pois é constituída, fundamentalmente, por água.

Verifica-se, assim, que, ao contrário do que acontece com os líquidos, o comportamento reológico das suspensões depende de uma grande quantidade de parâmetros que são função das interacções existentes na fase líquida, entre a fase líquida e as partículas sólidas e, apenas, entre as partículas sólidas.

4.3.1. Suspensões de Partículas Sólidas Esféricas, Monodimensionais e Electricamente Neutras em Líquidos Newtonianos

O estudo experimental do comportamento reológico das suspensões é, frequentemente, limitado aos casos em que as partículas sólidas são esféricas, monodimensionais e electricamente neutras. Estas simplificações permitem eliminar muitas das interacções influenciadoras do comportamento reológico das suspensões.

Assim, a consideração de partículas sólidas electricamente neutras, permite reduzir as forças que actuam na superfície das partículas apenas às forças hidrodinâmicas e, também, quando as partículas são coloidais, às *Brownianas*.

Por sua vez, a consideração de partículas sólidas esféricas e monodimensionais retira a influência de factores associados à granulometria e à forma das partículas da análise efectuada, permitindo relacionar os parâmetros reológicos, apenas, com o valor da fracção sólida da suspensão.

A primeira teoria desenvolvida para descrever as alterações existentes na viscosidade de um líquido de características reológicas *Newtonianas*, motivadas pela adição de partículas sólidas esféricas, foi apresentada por *Einstein* que fixou as seguintes condições de aplicabilidade:

- as partículas sólidas são esféricas, monodimensionais e de pequena dimensão;
- as partículas sólidas são electricamente neutras;
- as partículas sólidas estão dispersas no líquido;
- as colisões entre partículas sólidas são fortuitas.

Nestas condições, *Einstein* relacionou a viscosidade da suspensão com a da respectiva fase líquida através da seguinte equação:

$$\eta = \mu \left(1 + \frac{5}{2} \Phi \right) \quad (38)$$

Verifica-se, assim, que a presença de um pequeno número de partículas sólidas, nas condições anteriormente referidas, num líquido *Newtoniano* provoca um aumento da sua viscosidade directamente proporcional ao valor da respectiva fracção sólida.

As condições de aplicabilidade da equação de *Einstein* limitam, no entanto, consideravelmente, a sua aplicabilidade prática. Na realidade, mesmo para muito baixos valores da fracção sólida ocorrem interacções mecânicas entre as partículas sólidas que interferem no valor da viscosidade da suspensão.

Posteriormente, os estudos de *Ball e Richmond*, permitiram ampliar o campo de aplicação da teoria de *Einstein* a suspensões com fracções sólidas mais elevadas e, por isso, sujeitas a interacções mecânicas significativas entre as partículas sólidas. Estes estudos permitiram concluir que, qualquer que seja o valor da fracção sólida, a viscosidade da suspensão pode ser determinada a partir da seguinte equação:

$$\frac{\eta}{\mu} = (1 - K\Phi)^{-\frac{5}{2K}} \quad (39)$$

Esta equação corresponde, na prática, a uma generalização da equação de *Einstein*. Com efeito, para valores muito reduzidos da fracção sólida as duas equações são totalmente idênticas.

Por outro lado, na equação (39), quando $\Phi \rightarrow K^{-1}$, verifica-se que $\eta \rightarrow \infty$. A grandeza K^{-1} representa, então, a fracção sólida correspondente ao estado de máxima compactação atingido, aleatoriamente e em repouso, pelas partículas sólidas na suspensão, $\Phi_{\text{máx}}$.

Estudos experimentais demonstraram que nas suspensões o valor de $\Phi_{\text{máx}}$ não é constante mas, pelo contrário, é função da velocidade de deformação angular a que a suspensão está sujeita. Na realidade, verifica-se que numa suspensão, à medida que a velocidade de deformação angular aumenta, as partículas sólidas vão alterando a sua organização e orientação interna assumindo arranjos mais favoráveis e permitindo, assim, aumentar o valor máximo da sua fracção sólida.

No caso presente de suspensões de partículas sólidas esféricas monodimensionais e electricamente neutras, o valor máximo da fracção sólida pode variar, normalmente, entre um valor mínimo de 0,63 e um máximo de 0,71, quando a velocidade de deformação angular tende, respectivamente, para zero e infinito.

Conclui-se, assim, que a viscosidade de uma suspensão não é sempre constante e, apenas, função da fracção sólida existente e da fracção sólida máxima, tal como é proposto nos referidos estudos de *Ball e Richmond*, mas poderá ser dependente do valor da velocidade de deformação angular existente.

Este facto significa que a existência de partículas sólidas num meio fluido está na origem, não só de uma alteração da sua viscosidade mas, também, do seu comportamento reológico.

Apresenta-se, na *figura 23*, um gráfico proposto por *Krieger* [41] para descrever a relação existente entre a viscosidade relativa (η/μ) e a fracção sólida de uma suspensão de partículas esféricas com cerca de $1,0 \mu\text{m}$ de diâmetro, admitindo valores para a fracção sólida máxima iguais, respectivamente, a 0,63 e a 0,71.

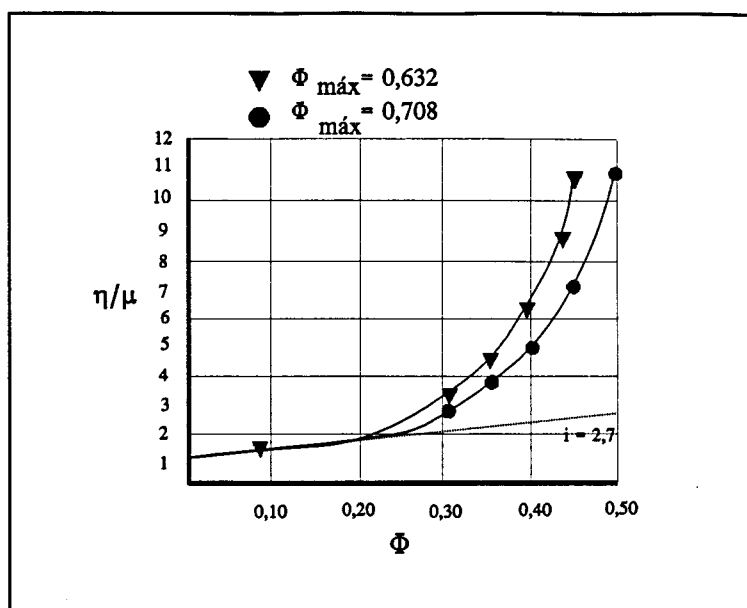


figura 23 – Relação entre a viscosidade relativa e a fracção sólida em suspensões de partículas esféricas, monodimensionais e electricamente neutras (adaptado de Krieger [41]).

Verifica-se que existem duas zonas distintas no gráfico apresentado na **figura 23**.

- a primeira zona, correspondente às suspensões diluídas, caracteriza-se por apresentar um aumento lento e linear do valor da viscosidade relativa para valores progressivamente maiores da respectiva fracção sólida e, ainda, pela independência da viscosidade relativa em relação à velocidade de deformação angular. Conclui-se, assim, que estas suspensões apresentam um comportamento reológico do tipo *Newtoniano*.
- a segunda zona, correspondente às suspensões concentradas, caracteriza-se por apresentar alterações significativas no valor da viscosidade relativa para pequenas flutuações do valor da fracção sólida e, ainda, pela dependência do valor da viscosidade relativa em relação à velocidade de deformação angular considerada. Neste caso, apesar da viscosidade da fase líquida ser constante, as suspensões apresentam um comportamento reológico do tipo não-*Newtoniano*.

Atendendo às diferenças existentes, justifica-se a tradicional separação do estudo do comportamento reológico destas suspensões em dois grupos:

- suspensões diluídas, quando $\Phi < 0,3$;
- suspensões concentradas, quando $\Phi > 0,3$.

Para as suspensões diluídas, a viscosidade é, apenas, função do valor da respectiva fracção sólida e pode ser determinada, quando os valores de Φ são muito baixos, pela equação (38), ou, para qualquer valor de Φ inferior a 0,3 e admitindo que $\Phi_{máx} = 0,63$, pela equação (39), ou, ainda, pela equação proposta por *Batchelor* para suspensões diluídas, onde a respectiva viscosidade é constante e, apenas, função da fracção sólida existente:

$$\frac{\eta}{\mu} = 1 + 2,5\Phi + 6,2\Phi^2 \quad (40)$$

A equação de *Batchelor* adiciona, apenas, o termo $6,2\Phi^2$ à equação proposta por *Einstein*. Pretende-se, assim, incluir a influência das interacções mecânicas entre as partículas sólidas na quantificação da viscosidade relativa.

Por sua vez, para suspensões concentradas, verifica-se que a equação (39), apresentada anteriormente, não permite uma fácil quantificação dos valores da viscosidade relativa, porque a fracção sólida máxima não é constante mas função da velocidade de deformação angular considerada. Justifica-se, assim, neste caso, relacionar directamente a viscosidade da suspensão com o valor da respectiva velocidade de deformação angular.

Estudos experimentais realizados por *Jones et al* [38] demonstraram que nestas suspensões existem três zonas. Nas zonas correspondentes a muito baixas e muito altas velocidade de deformação angular, a viscosidade assume valores sensivelmente estáveis, embora diferentes e, por sua vez, existe uma zona intermédia onde a viscosidade da suspensão é função da velocidade de deformação angular considerada.

A viscosidade destas suspensões pode ser, assim, bem representada quando $0,3 < \Phi < 0,63$, pela equação de *Cross* apresentada em seguida:

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + \left(b \frac{dv}{dr}\right)^m} \quad (41)$$

Quando a fracção sólida ultrapassa valores da ordem de 0,63, ocorre uma alteração significativa no comportamento reológico deste tipo de suspensões. Efectivamente, neste caso, estas suspensões passam a apresentar uma estrutura interna que resiste ao escoamento quando os valores da velocidade de deformação angular são inferiores a um determinado valor mínimo. Existe, assim, uma tensão de cedência, tendo o fluido um comportamento reológico do tipo viscoplástico.

4.3.2. Suspensões de Sólidos de Qualquer Natureza em Líquidos Newtonianos

As partículas sólidas existentes nas suspensões e, em particular, nas lamas, apresentam uma grande diversidade de formas, dimensões e características. A existência desta variedade de partículas, associada à multiplicidade de interacções que se desenvolvem, justificam a ocorrência de comportamentos reológicos do tipo não-Newtoniano mesmo para valores muito reduzidos da fracção sólida.

Analisa-se, em seguida, os efeitos que a consideração dos factores excluídos na análise realizada em 4.3.1., têm no comportamento reológico das suspensões, nomeadamente, as alterações provocadas pela existência de partículas com diversas formas, dimensões e com cargas eléctricas superficiais.

Quando numa suspensão de partículas sólidas esféricas existem partículas de várias dimensões, o valor da fracção sólida máxima pode ser substancialmente superior ao referido em 4.3.1.. Com efeito, esta grandeza passa a ser função da distribuição granulométrica das partículas sólidas, verificando-se, em geral, que, quando as partículas sólidas apresentam dimensões muito diferentes, o valor de $\Phi_{\max}$ pode aumentar significativamente pois, neste caso, os espaços deixados vazios pelas partículas de maiores dimensões podem ser ocupados pelas partículas mais pequenas.

Conclui-se, assim, que, para fracções sólidas idênticas, a viscosidade das suspensões de partículas esféricas polidimensionais é inferior à exibida por suspensões em que as partículas esféricas são monodimensionais.

Barnes et al [6] estudaram a influência que a consideração de mais do que um diâmetro para as partículas sólidas pode ter no valor da viscosidade relativa das suspensões.

Com base nos ensaios realizados, concluíram que, para suspensões com partículas sólidas esféricas de duas dimensões em que a relação entre os respectivos diâmetros é de 5:1, a influência que uma variação na percentagem ocupada por cada tipo de partículas no valor da viscosidade relativa da suspensão, pode ser dado pelo ábaco apresentado na *figura 24*.

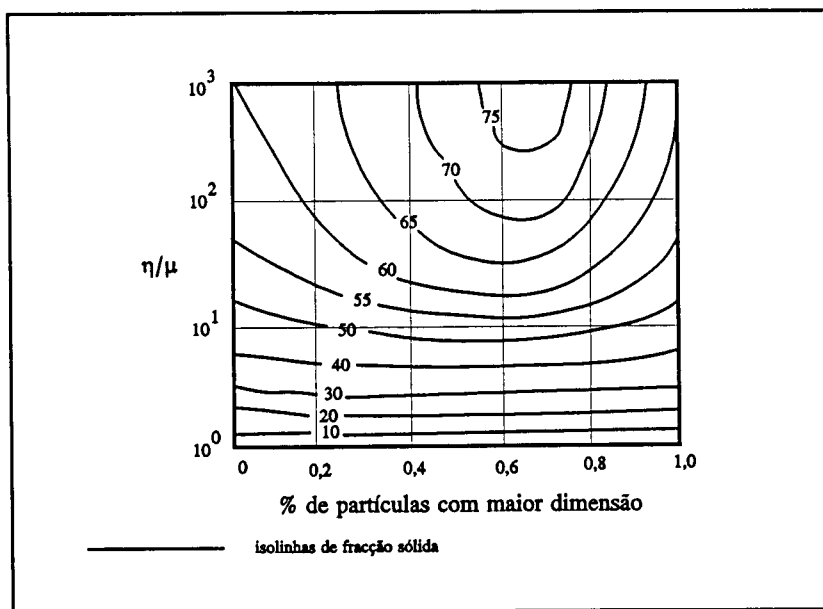


figura 24 – Influência da existência de partículas sólidas com duas dimensões diferentes na viscosidade da suspensão (adaptado de Barnes et al [6]).

Verifica-se, assim, que este factor assume, apenas, uma importância significativa para valores da fracção sólida superiores a 0,5.

Por sua vez, as suspensões de partículas com formas diferentes da esférica, apresentam, em geral, um aumento da respectiva viscosidade, relativamente às suspensões de partículas sólidas esféricas com valores da fracção sólida idênticos. Verifica-se, assim, que as suspensões de partículas sólidas de várias dimensões, com

formas diferentes mas electricamente neutras, apresentam, para a mesma fracção sólida, alterações ao valor da respectiva viscosidade, relativamente à situação descrita em 4.3.1..

Estas alterações consideram-se, no entanto e em conjunto, pouco relevantes, pelo menos quando os valores da fracção sólida são reduzidos, manifestando-se, sobretudo, por correcções ao valor da viscosidade e nunca por alterações do tipo de comportamento reológico da suspensão.

A existência de cargas eléctricas superficiais nas partículas sólidas tem, pelo contrário, grandes implicações a nível do comportamento reológico exibido pelas suspensões. Com efeito, quando as partículas sólidas têm cargas eléctricas superficiais do mesmo sinal, repelem-se mutuamente, organizando-se no meio líquido de modo a maximizar as distâncias existentes entre si. Em movimento, comportam-se, assim, como elementos individualizados do domínio fluido evitando qualquer tipo de interacção de natureza mecânica.

As suspensões de partículas deste tipo tendem, assim, a apresentar comportamentos reológicos do tipo *Newtoniano* quando as suspensões são diluídas e do tipo dilatante quando as suspensões são concentradas.

Por sua vez, quando as cargas superficiais existentes nas partículas sólidas são de sinais diferentes, ou quando as forças *Brownianas* assumem uma importância significativa, as partículas sólidas existentes na suspensão floculam formando estruturas sólidas internas que conferem um carácter marcadamente não-*Newtoniano* às suspensões, independentemente do valor da fracção sólida existente.

Estas características reológicas resultam no colapso progressivo da estrutura sólida interna à medida que a velocidade de deformação angular vai aumentando. Este colapso traduz-se, fisicamente, por uma redução progressiva da dimensão dos flocos existentes e, reologicamente, por uma diminuição progressiva do valor da viscosidade da suspensão.

Além disso, nestas suspensões, para valores elevados da fracção sólida, podem verificar-se comportamentos reológicos do tipo viscoplástico devido, sobretudo, à dimensão atingida pelos flocos sólidos que se agregam de modo a formar verdadeiras estruturas sólidas no meio da fase líquida envolvente.

Uma das fórmulas mais generalizadas utilizadas para quantificar o valor da viscosidade de suspensões é a desenvolvida por *Krieger et al* [41]:

$$\frac{\eta}{\mu} = (1 - K\Phi)^{-\frac{B}{K}} \quad (42)$$

Esta equação é, também, do tipo $\eta/\mu=f(\Phi)$ e constitui uma generalização das equações propostas por *Einstein* e por *Ball e Richmond*.

Efectivamente, quando $B=2,5$ a equação torna-se idêntica à proposta por *Ball e Richmond*. O coeficiente B designa-se, assim, por coeficiente de *Einstein* e é função do grau de agregação das partículas sólidas e da intensidade das forças coloidais de natureza eléctrica existentes entre as partículas. O valor mínimo desta

constante, correspondente à ausência de interações deste tipo, é, obviamente, 2,5 e, por sua vez, o valor máximo, de acordo com estudos experimentais efectuados em vários tipos de suspensões, é igual a 5.

Por último, apresenta-se, na *figura 25*, um gráfico onde se resumem os comportamentos reológicos típicos das suspensões em função do valor da sua fracção sólida e da intensidade das forças de atracção existentes entre as partículas.

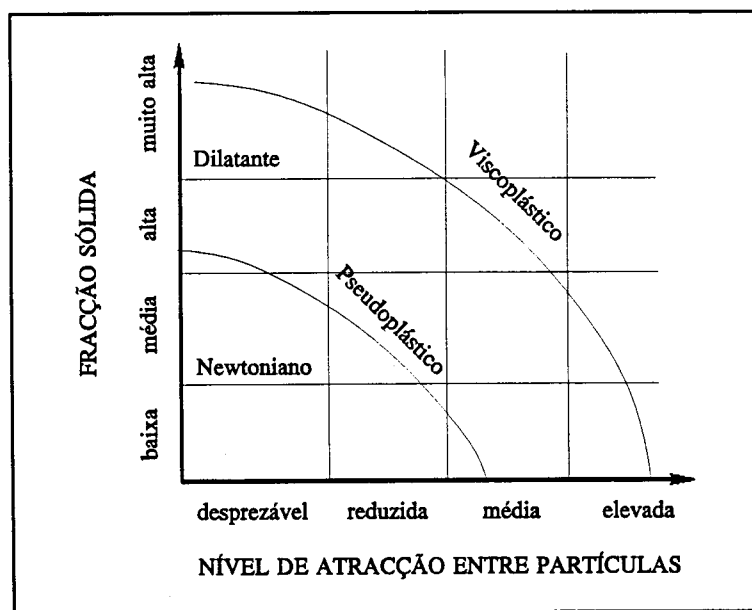


figura 25 – Caracterização do comportamento reológico das suspensões em função do tipo de interações existente entre as partículas sólidas.

4.4. DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS DOS FLUIDOS

A determinação das características reológicas constitui uma tarefa de importância fundamental na caracterização de um determinado fluido.

Nos estudos reológicos, a metodologia normalmente utilizada consiste na análise laboratorial de uma amostra de fluido, com recurso a equipamentos ou instalações apropriadas para medir e relacionar as grandezas fundamentais que definem o comportamento reológico dos fluidos.

No passado, a análise do comportamento reológico dos fluidos restringia-se à determinação da respectiva viscosidade, para alguns (poucos) valores da tensão tangencial ou da velocidade de deformação angular aplicada. Era, assim, possível, na melhor das hipóteses, confirmar as características não-Newtonianas de um determinado fluido, mas era totalmente impossível caracterizar o seu comportamento reológico.

Presentemente, a determinação das propriedades reológicas dos fluidos é realizada, com bastante rigor, em equipamentos especialmente concebidos para o efeito, denominados reómetros.

Os reómetros permitem analisar o comportamento reológico dos fluidos em intervalos bastante amplos de tensões tangenciais ou de velocidades de deformação angular e permitem, ainda, nos modelos mais sofisticados, conhecer outras propriedades dos fluidos, nomeadamente, a existência, ou não, de características viscoelásticas e tixotrópicas.

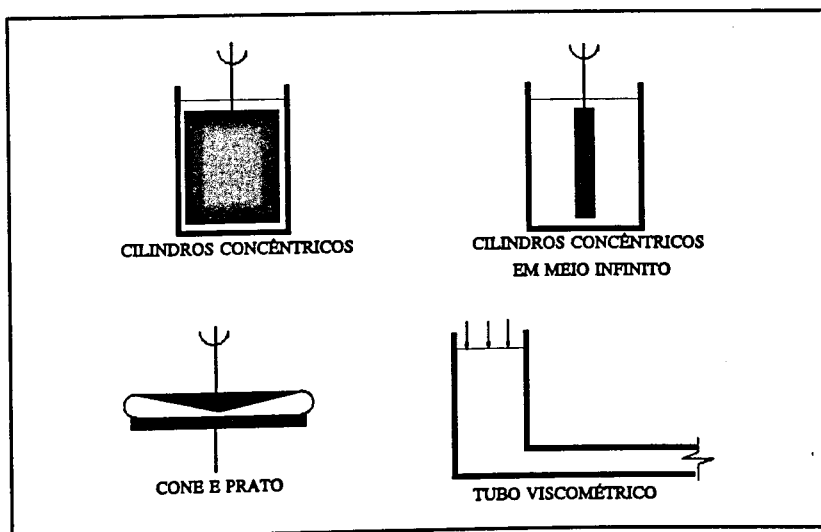
Os reómetros actualmente existentes dispõem, em geral, de várias geometrias alternativas para realizar a medição das propriedades reológicas dos fluidos. A selecção da geometria mais indicada para realizar um determinado teste depende de vários parâmetros mas, no caso de suspensões, a dimensão das partículas sólidas em suspensão e o valor da fracção sólida condicionam, fortemente, as opções existentes.

Embora existam muitas geometrias comercialmente disponíveis para realizar os ensaios reológicos nos reómetros, as mais comuns e, por isso, as que têm uma utilização mais frequente e universal são as seguintes:

- cilindros concêntricos;
- cilindros concêntricos em meio infinito;
- cone e prato.

Para além destes métodos, uma outra técnica muito utilizada na determinação do comportamento reológico dos fluidos, consiste na análise do seu escoamento em regime laminar em condutas. Este método, conhecido por *tubo viscométrico* ou *reómetro de extrusão*, permite determinar as propriedades reológicas do fluido a partir do conhecimento da dissipação de energia num determinado troço do escoamento. No entanto, ao contrário dos equipamentos anteriormente descritos, não é possível, neste caso, obter qualquer indicação sobre o carácter viscoelástico ou tixotrópico do fluido.

Apresenta-se, na *figura 26*, uma representação esquemática das metodologias normalmente utilizadas na medição do comportamento reológico dos fluidos.



*figura 26 – Geometrias normalmente utilizadas nos ensaios reológicos
(adaptado de Brown et al [12]).*

Importa, ainda, referir que a realização de testes reológicos num determinado fluido deve incluir, preferencialmente, ensaios com mais do que um tipo de aparelho.

Esta metodologia permite ampliar a gama da medição global e, ainda, comparar os resultados obtidos facilitando, assim, a interpretação e a detecção de anomalias existentes nas medições.

Efectua-se, em seguida, uma descrição pormenorizada das várias técnicas normalmente utilizadas para determinar o comportamento reológico dos fluidos.

4.4.1. Tubo Viscométrico ou Reómetro de Extrusão

Os reómetros de extrusão são, na realidade, condutas em miniatura, construídas em laboratório, equipadas com dispositivos que permitem medir a relação entre o caudal escoado e a perda de carga existente no escoamento de fluidos em regime laminar.

No escoamento de um fluido em regime laminar numa conduta de secção circular, a tensão tangencial e a velocidade de deformação angular são nulas no eixo da conduta e assumem o valor máximo junto às paredes sólidas que limitam o escoamento.

O valor da tensão tangencial junto às paredes sólidas pode ser determinado a partir da equação que traduz o equilíbrio de forças entre duas secções do escoamento:

$$\frac{\pi D^2}{4} \Delta P = \pi DL \tau_p \quad (43)$$

ou seja:

$$\tau_p = \frac{D \Delta P}{4L} \quad (44)$$

Por sua vez, admitindo que não existe deslizamento junto às paredes sólidas, a velocidade de deformação angular será, no caso mais geral de um fluido não-Newtoniano, dada pela equação de Rabinowitsch-Mooney:

$$\left(\frac{dv}{dr} \right)_p = \frac{1 + 3n'}{4n'} \frac{8U}{D} \quad (45)$$

sendo:

$$n' = \frac{d(\ln \tau_p)}{d\left(\ln \frac{8U}{D}\right)} \quad (46)$$

Demonstra-se, facilmente, que, para fluidos Newtonianos, $n'=1$ e, por isso, $(dv/dr)_p=8U/D$.

Por outro lado, quando o fluido é não-Newtoniano e o seu comportamento reológico pode ser descrito por um modelo do tipo *lei de potência*, conclui-se que $n \neq 1$. Neste caso, se o fluido for do tipo pseudoplástico, o valor da sua velocidade de deformação angular junto às paredes sólidas que limitam o escoamento pode atingir, para a mesma tensão tangencial aplicada, valores bastante superiores aos verificados quando os fluidos são *Newtonianos*.

Os tubos viscométricos são, em geral, construídos no próprio laboratório. Apresenta-se na *figura 27* o esquema de um modelo desenvolvido por *Lazarus e Sive*, denominado por "*Balanced Beam Tube Viscometer*" (BBTV), que se afigura particularmente indicado para a determinação do comportamento reológico de suspensões concentradas.

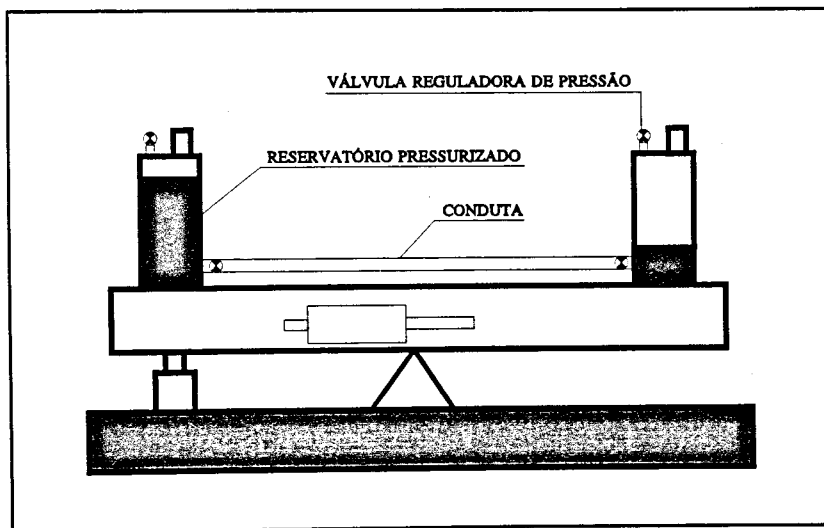


figura 27 – Representação esquemática do "Balanced beam tube viscometer" (adaptado de Brown et al [12]).

No "*Balanced Beam Tube Viscometer*", o escoamento do fluido é conseguido por acção da injeção de ar comprimido nos reservatórios localizados nas extremidades da conduta. A entrada controlada do ar nos reservatórios, provoca o escoamento da suspensão através de uma conduta transparente com a velocidade desejada. A perda de carga na conduta é medida por meio de um transdutor diferencial de pressão.

Neste reómetro, as grandezas medidas são, então, a velocidade média do escoamento e a perda de carga que, como foi anteriormente referido, podem ser relacionadas com a tensão tangencial e a velocidade de deformação angular. É, assim, possível definir rigorosamente o instante em que o escoamento passa de laminar a turbulento e, também, determinar as características reológicas do fluido com base nos elementos obtidos quando o regime do escoamento é laminar.

Os principais problemas e causas de erro associados à utilização destes aparelhos são:

- a definição do instante em que o regime do escoamento passa de laminar para turbulento;

- a ocorrência de interferências nos valores medidos devido à proximidade das secções de saída e de entrada nos reservatórios situados nas extremidades;
- a existência de deslizamento junto às paredes da conduta.

Relativamente à definição do instante em que ocorre a transição do regime laminar para turbulento, é possível defini-lo através da quantificação do número de *Reynolds* do escoamento.

Apresenta-se, no **Capítulo 5**, uma análise detalhada da fase de transição do regime laminar para o turbulento, incluindo uma descrição das condições em que ocorre e dos parâmetros que a caracterizam.

Refere-se, no entanto, que é possível visualizar facilmente o instante em que a transição acontece, com base numa representação gráfica dos valores medidos num sistema de eixos coordenados ($\log(\tau_p)$; $\log(8U/D)$). Efectivamente, verifica-se que, nesta representação gráfica, os regimes de escoamento laminar e turbulento são definidos por rectas com inclinações bastante diferentes, ocorrendo, por isso, a transição no ponto de intercepção dessas duas rectas.

Por sua vez, a ocorrência de interferências nos valores medidos devido à proximidade das secções de saída e de entrada nos reservatórios de extremidade, traduz-se pelo aumento dos valores das perdas de carga entre as duas secções de medida.

Consegue-se evitar a ocorrência destas perturbações nas leituras, realizando as tomadas de pressão em secções suficientemente afastadas das secções de entrada e de saída. Garante-se, deste modo, a estabilização do escoamento no troço da conduta onde se efectua a medição da perda de carga.

Por último, a verificação da ocorrência de deslizamento junto às paredes sólidas pode ser efectuada por simples comparação dos valores das tensões tangenciais e das respectivas velocidades de deformação angular em condutas de diferentes diâmetros. Se houver deslizamento, verifica-se que os valores medidos são diferentes em função do diâmetro da conduta considerada.

Atendendo a que a ocorrência de deslizamento é uma hipótese comum a muitos dos equipamentos utilizados na medição das propriedades reológicas dos fluidos, apresenta-se, no final deste capítulo, uma análise específica sobre as causas, características e modos de evitar a sua ocorrência, durante a realização de ensaios reológicos.

4.4.2. Cilindros Concêntricos

Neste equipamento, o fluido cujas propriedades reológicas se pretendem conhecer, é colocado no intervalo, de largura muito reduzida, entre dois cilindros concêntricos.

O cilindro exterior é estático e consiste no recipiente dentro do qual se coloca o fluido. O posicionamento de um cilindro rotativo no interior do recipiente, de acordo com o esquema apresentado na *figura 28*, permite estudar o comportamento reológico do fluido bastando, para isso, conhecer a velocidade

de rotação do cilindro e a torção provocada, no seu eixo, pela tensão tangencial existente na superfície de contacto com o fluido.

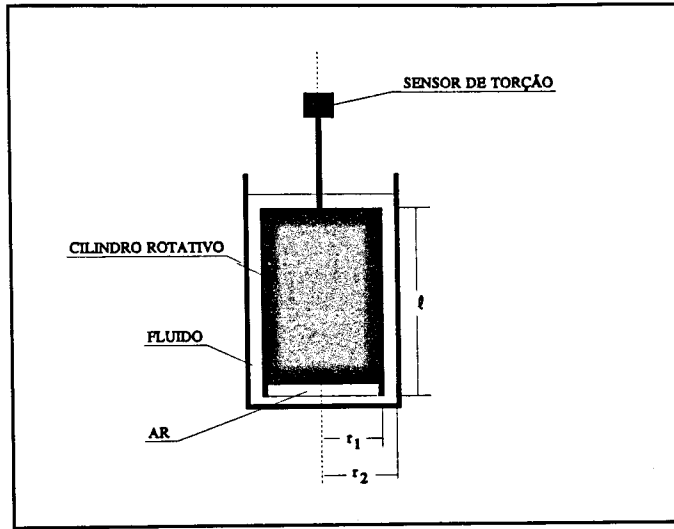


figura 28 – Cilindros concêntricos.

Consegue-se, assim, simular no fluido um escoamento de *Couette*, ou seja, um escoamento laminar e plano entre duas superfícies paralelas em que uma delas se desloca, paralelamente à outra, com uma determinada velocidade.

Analisando a *figura 28* verifica-se que, nesta geometria, a distância livre entre as superfícies dos dois cilindros é bastante reduzida o que pode impedir a sua utilização no caso de suspensões de partículas sólidas.

Nas condições referidas, a torção provocada no eixo do cilindro rotativo pode ser relacionada com a tensão tangencial existente na superfície em contacto com o fluido, pela seguinte equação:

$$\tau_p (2\pi r_1 l) r_1 = 2\pi r_1^2 l \tau_p = T \quad (47)$$

ou seja:

$$\tau_p = \frac{T}{2\pi r_1^2 l} \quad (48)$$

Por sua vez, a relação entre a velocidade de deformação angular do fluido junto à fronteira sólida e a geometria do cilindro pode ser dada pela equação de *Krieger et al* [42]:

$$\left(\frac{dv}{dr}\right)_p = \frac{4\pi N}{1 - E_r^{-2}} F_{KM} \quad (49)$$

Nesta equação $E_r = r_2/r_1$ e F_{KM} é um coeficiente correctivo que, quando $E_r \leq 1,2$, é dado pela seguinte expressão:

$$F_{KM} = 1 + \frac{E_r^2 - 1}{2E_r^2} \left(1 + \frac{2}{3} \ln E_r\right) \left(\frac{1}{n''} - 1\right) + \frac{E_r^2 - 1}{6E_r^2} \ln E_r \left[\left(\frac{1}{n''} - 1\right)^2 + \frac{d\left(\frac{1}{n''} - 1\right)}{d \log T}\right] \quad (50)$$

sendo:

$$n'' = \frac{d(\ln T)}{d(\ln N)} \quad (51)$$

Para fluidos cujo modelo reológico é a *lei de potência*, o valor da velocidade de deformação angular pode ser obtido com uma precisão superior a 99%, quando $E_r \leq 1,75$, a partir da seguinte expressão:

$$\left(\frac{dv}{dr}\right)_p = \frac{4\pi N}{1 - E_r^{-2}} C_s \quad (52)$$

O valor da constante $C_s = f(n'', E_r)$ é fornecido, em forma de tabela, por Skelland [75].

Para fluidos *Newtonianos*, verifica-se que $n''=1$ e $F_{KM}=1$.

Refere-se, ainda, que, com esta geometria, é possível realizar medições do comportamento reológico dos fluidos até valores da velocidade de deformação angular da ordem de 10^3 s^{-1} . No entanto, os valores medidos, quando $dv/dr < 1,0 \text{ s}^{-1}$, têm uma precisão muito inferior aos restantes.

As principais causas de erro detectadas nas medições realizadas com esta geometria são as seguintes:

- contribuição das superfícies superior e inferior do cilindro rotativo para o aumento da torção medida;
- existência de deslizamento junto às superfícies dos dois cilindros.

A contribuição das superfícies superior e inferior dos cilindros concêntricos para a resistência global do cilindro ao escoamento e, conseqüentemente, para o aumento do valor da torção medida, pode atingir, no máximo, valores da ordem de 30% do valor medido. Importa, assim, minimizar ou quantificar essa contribuição para garantir a precisão dos valores medidos.

Consegue-se minimizar o valor deste erro utilizando cilindros com comprimento muito superior ao respectivo diâmetro ou, ainda, cilindros com a superfície inferior côncava, de modo a conseguir aprisionar um determinado volume de ar que funcionará como tampão impedindo, assim, o contacto do fluido com a superfície inferior do cilindro.

Outra alternativa consiste em substituir, nas equações anteriores, o comprimento real do cilindro por um comprimento efectivo superior ao real, determinado, nomeadamente, por calibração do aparelho com um fluido *Newtoniano* de viscosidade conhecida. O comprimento adicional será, assim, equivalente à contribuição das superfícies superior e inferior para o valor da torção medida.

Em relação ao erro associado ao deslizamento do fluido junto às fronteiras sólidas, refere-se, também neste caso, que é feita uma análise específica a este fenómeno no final deste capítulo.

4.4.3. Cilindros Concêntricos em Meio Infinito

Os cilindros concêntricos em meio infinito representam o caso especial dos cilindros concêntricos em que o diâmetro do recipiente é muito superior ao do cilindro rotativo. Neste caso, pode considerar-se que o fluido na zona adjacente à superfície do recipiente não é afectado pelo movimento, mantendo-se em repouso.

A tensão tangencial junto à superfície do cilindro rotativo é, ainda neste caso, dada pela equação (48) mas, a velocidade de deformação angular é, agora, dada pela seguinte equação:

$$\left(\frac{dv}{dr}\right)_p = \frac{4\pi N}{n''} \quad (53)$$

A principal vantagem da utilização desta geometria consiste na possibilidade de se poder utilizar, mesmo quando se estudam suspensões cujo diâmetro das partículas assume dimensões relativamente elevadas.

Considera-se possível realizar, com esta geometria, medições em suspensões cujo diâmetro máximo das partículas não ultrapassa um valor de cerca de 1/6 da distância entre cilindros.

Nas medições com esta geometria, a gama de medição, a precisão dos valores medidos e as principais causas de erro detectadas são idênticas às referidas em 4.4.2. para os cilindros concêntricos.

4.4.4. Cone e Prato

De acordo com o esquema apresentado na *figura 29*, esta geometria consiste, essencialmente, num cone invertido cujo vértice está quase em contacto com uma superfície plana que se designa por prato.

Quando o cone está animado de um determinado movimento de rotação, o conhecimento do valor da torção no seu eixo, permite definir o comportamento reológico da amostra de fluido existente no espaço livre entre o cone e o prato.

Nesta geometria $\theta \leq 1^\circ$ e, por isso, pode admitir-se que $\tan \theta \approx \theta$ e, então, a velocidade de deformação angular do fluido, a uma distância r_c do eixo do cone, será dada pela seguinte equação:

$$\left(\frac{dv}{dr}\right)_{r_c} = \frac{2\pi r_c N}{r_c \tan\theta} \approx \frac{2\pi N}{\theta} \quad (54)$$

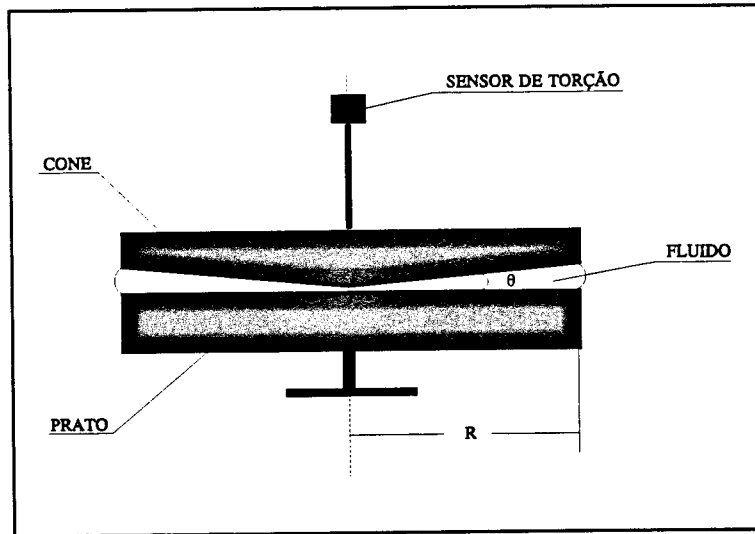


figura 29 – Cone e prato.

Por sua vez, o valor da torção no eixo do cone é dado pela seguinte equação:

$$T = 2\pi\tau \int_0^R r_c^2 dr \quad (55)$$

ou seja:

$$\tau = \frac{3T}{2\pi R_c^3} \quad (56)$$

Conclui-se, assim, que, nesta geometria, os valores da velocidade de deformação angular e da tensão tangencial são constantes qualquer que seja o ponto escolhido no domínio fluido. Por este motivo, a interpretação dos resultados obtidos nos ensaios reológicos é muito simples e rápida, quando comparada com as outras disponíveis.

Além disso, a gama de medição do comportamento reológico é, no cone e prato, bastante superior à existente nas outras geometrias, variando entre valores da velocidade de deformação angular de 10^{-3} e 10^3 s^{-1} , mas podendo, em alguns reômetros mais recentes, atingir valores de cerca de 10^{-6} s^{-1} .

A reduzida dimensão do espaço livre existente entre o cone e o prato impede, em geral, a utilização desta geometria na realização de ensaios reológicos em suspensões pois pode facilmente ocorrer, em simultâneo, o contacto de uma partícula sólida existente no fluido com as duas superfícies do aparelho.

4.4.5. Detecção de Comportamentos Reológicos Dependentes do Tempo

A detecção de comportamentos reológicos do tipo tixotrópico ou anti-tixotrópico em fluidos e, em particular, em suspensões é, normalmente, realizada através de ensaios reológicos especialmente programados para permitir pôr em evidência essas características. Considera-se, no entanto, que, devido às suas características específicas, não é possível realizar este tipo de ensaios nos tubos viscométricos.

Nas geometrias disponíveis para realizar os ensaios reológicos em reómetros rotativos, a realização de testes para determinar a existência de comportamentos reológicos dependentes do tempo exige cuidados especiais, nomeadamente, na manipulação do fluido e na própria metodologia seguida durante o ensaio para não alterar, prematuramente, as propriedades reológicas do fluido que se pretende analisar.

Assim, o primeiro cuidado a ter, antes de iniciar o ensaio, consiste na conservação do fluido em repouso, de preferência no próprio dispositivo onde se realizará a análise, durante um intervalo de tempo bastante longo. Por sua vez, o ensaio deve realizar-se repetindo, sucessivamente, vários ciclos de funcionamento em que o valor da tensão tangencial ou da velocidade de deformação angular vai, primeiro, aumentando gradualmente entre zero e o valor máximo possível no reómetro, decrescendo, em seguida, lentamente, até zero.

Quando os fluidos têm propriedades reológicas dependentes do tempo, a representação gráfica, num sistema de eixos coordenados (τ , $\dot{\gamma}$), permite visualizar a existência de ciclos de histerese convergentes para uma configuração limite de equilíbrio, atingida quando a estrutura interna que confere ao fluido o carácter de dependência em relação ao tempo, é totalmente destruída.

4.4.6. Medição da Tensão de Cedência

A determinação exacta da tensão de cedência de um fluido constitui, talvez, o objectivo mais difícil de atingir nos estudos reológicos.

Na realidade, esta determinação efectua-se, normalmente, na gama das muito baixas tensões tangenciais ou velocidades de deformação angular e, por isso, os desvios nos valores medidos, devidos a interferências mecânicas dos aparelhos ou a fenómenos como o deslizamento junto à fronteira sólida, podem atingir proporções da mesma ordem de grandeza, ou mesmo superiores, às dos próprios valores medidos.

Actualmente, quando se pretende medir com rigor a tensão de cedência, recorre-se a ensaios específicos concebidos de forma a minimizar as possíveis interferências. Pelo contrário, quando não interessa conhecer o valor exacto da tensão de cedência mas, simplesmente, um valor provável, é suficiente realizar uma extrapolação aos valores obtidos em ensaios reológicos convencionais.

Assim, os métodos existentes para determinar o valor da tensão de cedência nos fluidos podem ser classificados do seguinte modo:

- métodos indirectos;
- métodos directos.

4.4.6.1. *Métodos Indirectos*

Os métodos indirectos baseiam-se na extrapolação dos resultados obtidos nos ensaios reológicos convencionais. Admite-se, assim, que o comportamento reológico do fluido na zona de tensões tangenciais e, consequentemente, de velocidades de deformação angular inferior à abrangida pelo ensaio, mantém as mesmas características.

A fixação do valor da tensão de cedência pode, então, ser efectuada graficamente ou numericamente.

A fixação gráfica do valor da tensão de cedência consiste, simplesmente, no prolongamento dos valores medidos, num sistema de eixos coordenados (dv/dr ; τ_p), até ser interceptado o eixo das ordenadas, correspondendo o respectivo ponto de intercepção ao valor provável da tensão de cedência do fluido.

Por sua vez, a fixação numérica do valor da tensão de cedência, efectua-se a partir do ajuste de um modelo reológico conhecido aos valores obtidos nos ensaios reológicos.

4.4.6.2. *Métodos Directos*

Os métodos directos consistem na realização de ensaios específicos, utilizando, quase sempre, os dispositivos descritos entre 4.4.2. e 4.4.4., mas com o objectivo de determinar, com o máximo rigor, o valor da tensão tangencial necessário para dar início ao escoamento do fluido.

Os métodos directos existentes para medir a tensão de cedência são:

- teste da tensão residual;
- "creep test";
- teste da tensão de rotura;
- "vane test";
- "cone penetration test" CPT.

4.4.6.2.1. Teste da Tensão Residual

No teste da tensão residual, o valor da tensão de cedência considera-se idêntico ao da tensão residual medida no fluido após a interrupção do seu escoamento.

Este teste é realizado num reómetro do tipo rotacional, utilizando uma das geometrias anteriormente referidas, e engloba duas fases. Na primeira fase, o fluido é colocado em movimento sujeito a uma tensão

tangencial ou a uma velocidade de deformação angular constante. Em seguida, numa segunda fase, o fluido é colocado, gradual ou subitamente, em repouso, medindo-se o valor da torção remanescente no aparelho.

Importa referir que esta técnica de medição da tensão de cedência só pode ser utilizada com fluidos que não apresentem propriedades reológicas dependentes do tempo, pois a aplicação ao fluido, na primeira fase, de uma tensão superior à sua tensão de cedência pode alterar, definitivamente, a sua estrutura interna.

4.4.6.2.2. "*Creep Test*"

No "*creep test*" avalia-se a evolução do comportamento do fluido a partir do conhecimento de valores de tensões associadas, respectivamente, às fases elástica, plástica e viscosa do fluido. Este teste consiste, assim, na aplicação de tensões tangenciais de muito baixo valor, mas com intensidade crescente, ao fluido e na medição, para cada tensão aplicada, do seu comportamento mecânico.

Assim, para valores da tensão tangencial muito inferiores aos da tensão de cedência, o fluido apresenta um comportamento do tipo elástico, semelhante ao exibido por uma substância sólida, caracterizado por uma deformação crescente no tempo mas convergente para um determinado valor máximo. Se, posteriormente, a tensão tangencial for removida, o fluido recupera lentamente a configuração inicial anulando, assim, a deformação sofrida.

Aumentando, progressivamente, os valores da tensão tangencial aplicada ao fluido, verifica-se que, antes de se atingir a tensão de cedência, o fluido passa por uma fase em que o comportamento, durante a aplicação da tensão tangencial, é semelhante ao anteriormente referido mas, quando a tensão tangencial é removida, o fluido não recupera totalmente a forma inicial exibindo uma deformação residual. Esta é a fase plástica.

Por último, a partir de um determinado valor da tensão tangencial aplicada, a deformação cresce infinitamente com o tempo, ou seja, o fluido deixa de se comportar como um sólido passando a escoar-se como um líquido. Nesse instante ultrapassou-se a tensão de cedência do fluido, cujo valor será, assim, intermédio entre o desta tensão e o da tensão imediatamente anterior, quando o fluido ainda apresentava um comportamento plástico.

Apresenta-se, na **figura 30**, diagramas típicos da evolução da deformação de um fluido com tensão de cedência, para vários valores da tensão tangencial aplicada, seguindo a metodologia preconizada para a realização do "*creep test*".

Importa, ainda, referir que sendo, no "*creep test*", a determinação da tensão de cedência efectuada por aumentos graduais do valor da tensão tangencial aplicada, evita-se, assim, uma possível destruição da estrutura interna do fluido durante a realização do ensaio e, por isso, consegue-se uma grande exactidão nas medidas efectuadas.

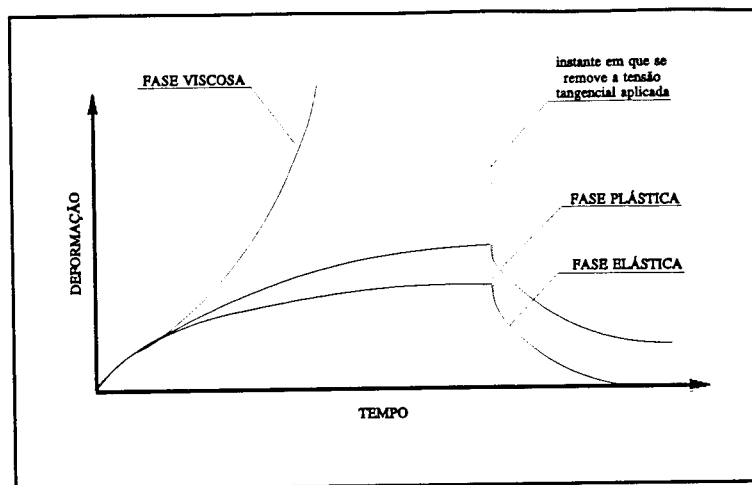


figura 30 – Diagramas típicos resultantes da realização de um "creep test" (adaptado de Nguyen et al [58]).

4.4.6.2.3. Teste da Tensão de Ruptura

O teste da tensão de ruptura é realizado, tal como os anteriormente referidos, em reómetros rotacionais e consiste na medição da evolução no tempo do valor da tensão tangencial existente no fluido, quando este está sujeito a uma velocidade de deformação angular constante mas extremamente baixa.

Neste caso, apresenta-se, na *figura 31*, um diagrama típico da resposta apresentada pelo fluido em termos das tensões tangenciais medidas.

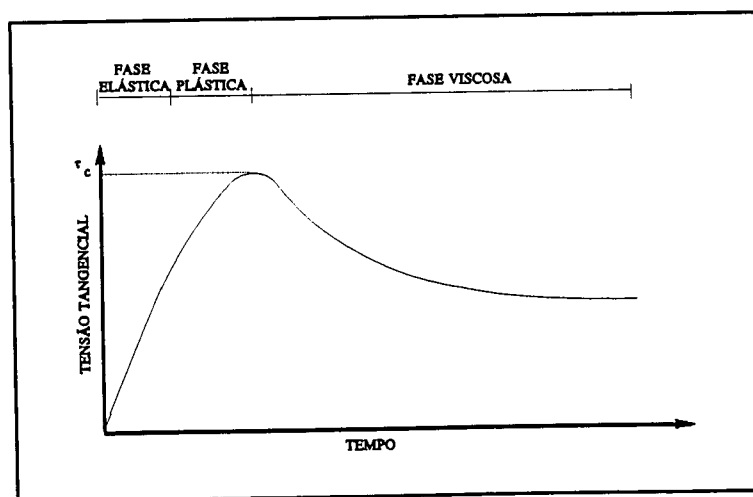


figura 31 – Diagrama típico da realização de um teste da tensão de ruptura (adaptado de Nguyen et al [58]).

Analisando a *figura 31*, verifica-se que a resposta do fluido caracteriza-se por apresentar, inicialmente, uma fase linear, correspondente a um comportamento do tipo elástico.

Segue-se uma zona em que a evolução da tensão no tempo não é linear, correspondente a um comportamento do tipo plástico, que culmina com a rotura do fluido no instante em que se atinge a tensão tangencial máxima.

Por último, existe uma fase bastante extensa, em que se verifica uma diminuição gradual do valor da tensão tangencial, que converge para um valor positivo constante. Nesta fase considera-se que o comportamento é do tipo viscoso e, por isso, o fluido escoar-se com uma determinada velocidade.

Com base na interpretação efectuada, é possível concluir que a tensão máxima atingida no teste corresponde à tensão de cedência do fluido, pois coincide com o instante em que ocorre a rotura da sua estrutura interna.

4.4.6.2.4. "*Vane Test*"

O "*vane test*" é um teste reológico em que se utiliza uma geometria alternativa aos cilindros concêntricos em meio infinito, destinada a minimizar a ocorrência de deslizamento do fluido junto às paredes sólidas, para valores muito baixos da tensão tangencial ou da velocidade de deformação angular.

Adopta-se, assim, a geometria alternativa apresentada na *figura 32*, constituída por quatro pás unidas a um eixo central rotativo.

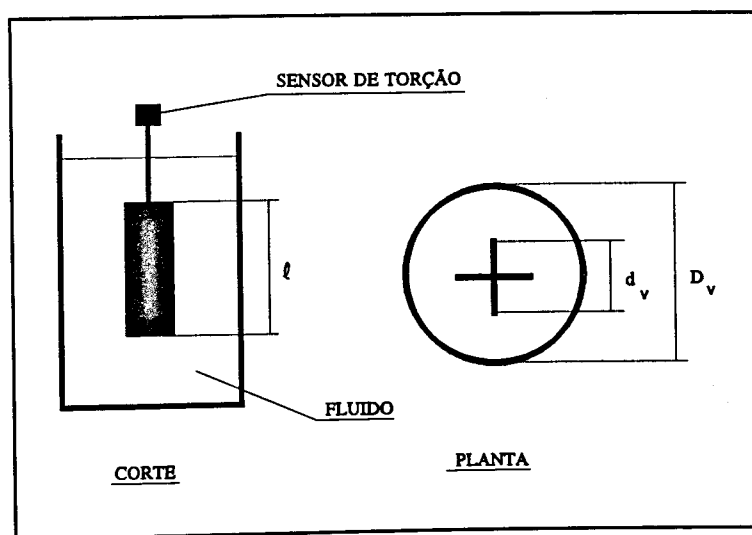


figura 32 – Representação esquemática do dispositivo utilizado no "vane test".

No "*vane test*" a determinação da tensão de cedência efectua-se de modo semelhante ao descrito no caso do teste da tensão de rotura, isto é, a partir do conhecimento da evolução do valor da torção no eixo do aparelho ao longo do tempo, para uma determinada velocidade de rotação constante mas extremamente baixa.

É, assim, possível determinar o valor da torção máxima no dispositivo que pode ser relacionada com a tensão de cedência do fluido.

O cálculo da tensão de cedência do fluido é realizado admitindo que o dispositivo consiste num cilindro fictício com um diâmetro igual à largura das pás. Neste caso, é possível relacionar a tensão de cedência com a torção máxima medida pela seguinte expressão:

$$T_{máx} = (\pi d_v l) \frac{d_v}{2} \tau_c + 4 \pi \int_0^{\frac{d_v}{2}} \tau(r) r^2 dr \quad (57)$$

Admitindo que a distribuição de tensões tangenciais nas superfícies superior e inferior do cilindro fictício é constante e igual a τ_c , a equação (57) reduz-se a:

$$T_{máx} = \frac{\pi d_v^3}{2} \left(\frac{l}{d_v} + \frac{1}{3} \right) \tau_c \quad (58)$$

Nguyen e Boger [57] demonstraram que a consideração de $\tau(r)=\tau_c$ é, em geral, razoável para dispositivos em que $l/d_v \geq 2$.

4.4.6.2.5. "Cone Penetration Test" CPT

O "cone penetration test" é um teste realizado com um cone metálico, de ângulo 2α , que é introduzido, lentamente, no fluido sob acção de uma força de intensidade constante, de acordo com o esquema apresentado na *figura 33*.

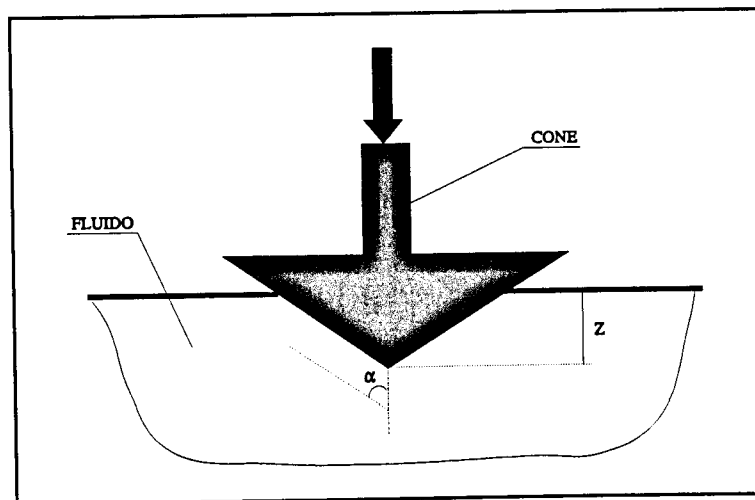


figura 33 – Representação esquemática do "cone penetration test" (adaptado de Boger [10]).

Neste teste, à medida que o cone vai penetrando no fluido, a superfície de contacto entre o cone e o fluido vai progressivamente aumentando e, consequentemente, o valor da tensão tangencial existente nessa superfície vai sofrendo uma diminuição progressiva. Quando o valor da tensão tangencial na superfície iguala o da tensão de cedência do fluido, atinge-se uma situação de equilíbrio e o cone interrompe o seu movimento descendente.

A tensão de cedência pode ser, assim, determinada a partir do valor da força aplicada (adicionada do peso próprio do cone), e da altura imersa do cone pela seguinte equação:

$$\tau_c = \frac{\zeta F}{Z^2} \quad (59)$$

Admitindo que, na situação de equilíbrio, a tensão tangencial na superfície do cone em contacto com o fluido é constante, então:

$$\zeta = \frac{(\cot \alpha)^2}{\pi} \quad (60)$$

Importa, por último, referir que, na prática, este teste é, apenas, realizável em fluidos que possuam valores da tensão de cedência bastante elevados.

4.5. DESLIZAMENTO JUNTO ÀS FRONTEIRAS SÓLIDAS DO ESCOAMENTO

O fenómeno designado por deslizamento consiste, na realidade, na migração das partículas sólidas existentes nas suspensões para regiões mais afastadas da fronteira sólida que limita o escoamento.

Forma-se, assim, uma camada de muito pequena espessura, denominada *camada de deslizamento*, adjacente à fronteira sólida do escoamento que é, apenas, constituída pela fase líquida da suspensão. Esta camada tem, assim, uma viscosidade muito inferior à da suspensão facilitando o seu escoamento.

Na prática, o fenómeno do deslizamento consiste na formação de um filme líquido de muito pequena espessura (normalmente inferior a $10 \mu\text{m}$), que tem um efeito lubrificante sobre o escoamento do fluido.

O processo de migração das partículas sólidas para regiões mais afastadas da fronteira sólida que limita o escoamento, deve-se à acção de forças de natureza hidrodinâmica, viscoelástica, química e gravítica que actuam entre as partículas sólidas e entre estas o meio líquido envolvente e a fronteira sólida.

Mesmo em repouso, a presença de uma fronteira sólida provoca perturbações nas suspensões que se traduzem por uma disposição especial das partículas sólidas situadas nas suas proximidades. Efectivamente, nestas condições, é geometricamente impossível que os centros geométricos das partículas estejam localizados numa faixa, adjacente à fronteira sólida, com uma largura inferior ao raio das partículas.

Além disso, nas partículas coloidais existem, mesmo em repouso, acções de natureza *Browniana* entre as partículas que as mantêm em suspensão. A natureza isotrópica dessas forças impede que estas partículas entrem em contacto com a superfície sólida adjacente, afastando-as, mesmo, de uma camada com uma largura igual, pelo menos, ao seu raio, situada junto à fronteira sólida (*Delime et al [20]*).

Por sua vez, quando existe escoamento, para além dos factores anteriormente referidos, verifica-se, ainda, que os elevados gradientes de velocidades existentes na zona adjacente à fronteira sólida (denominada por camada limite), contribui, também, para o afastamento das partículas sólidas.

Estas partículas migram dessa zona para outras onde as tensões tangenciais existentes têm uma intensidade inferior. Este movimento, com uma direcção perpendicular à do escoamento, é, ainda, agravado pelas colisões que se verificam entre as partículas no seu movimento em direcção ao eixo da conduta.

Segundo *Barnes* [5], os principais factores que contribuem para a ocorrência de deslizamento são os seguintes:

- existência no fluido de partículas com grandes dimensões (sólidos floculentos, por exemplo);
- grande dependência do valor da viscosidade do fluido em relação aos valores da sua fracção sólida;
- escoamento limitado por superfície sólidas lisas;
- reduzida dimensão da secção do escoamento;
- baixos caudais ou, nos reómetros rotativos, baixas velocidades de rotação;
- existência de cargas eléctricas superficiais, com o mesmo sinal, nas partículas sólidas e/ou na superfície sólida que limita o escoamento;
- fase líquida electricamente condutiva.

Pela natureza dos aparelhos utilizados, os ensaios reológicos estão particularmente sujeitos à ocorrência de fenómenos de deslizamento. O deslizamento pode ocorrer, em princípio, em qualquer tipo de viscosímetro ou de reómetro pois existe, sempre, uma superfície fronteira sólida em contacto com o fluido. No entanto, este fenómeno atinge maiores proporções em dispositivos cuja superfície de contacto com o fluido seja muito lisa ou em tubos viscométricos com diâmetro muito reduzido (tubos capilares).

É possível detectar a existência de deslizamento nos ensaios reológicos a partir da comparação dos resultados obtidos quando se varia a dimensão da geometria considerada. Assim, no caso de tubos viscométricos, detecta-se a existência de deslizamento a partir da comparação gráfica dos resultados obtidos em tubos de diferentes diâmetros, de acordo com o esquema apresentado na *figura 34*.

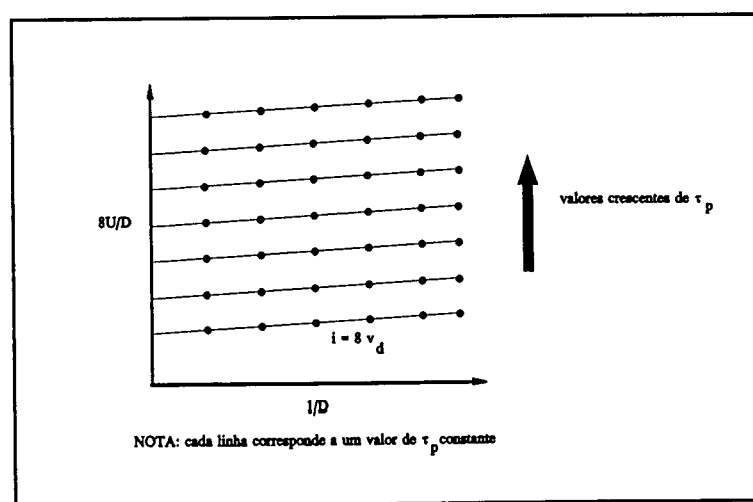


figura 34 – Verificação de ocorrência de deslizamento num tubo viscométrico (adaptado de Brown et al [12]).

Verifica-se, pois, que num tubo viscométrico existe deslizamento quando os valores obtidos para a relação entre a tensão tangencial e a velocidade de deformação angular dependem do diâmetro do tubo considerado. A inclinação das rectas traduz, assim, a existência de deslizamento.

A contribuição da existência do deslizamento para o aumento do valor do caudal escoado na conduta, pode ser determinado a partir do conhecimento da velocidade de deslizamento, que é, numericamente, proporcional à inclinação das rectas apresentadas na *figura 34*.

Por sua vez, no caso de reómetros rotativos, a detecção da existência de deslizamento segue uma metodologia semelhante mas, neste caso, comparam-se os valores medidos das tensões tangenciais e das velocidades de deformação angular em ensaios realizados utilizando dispositivos com diferentes diâmetros.

A consideração de resultados de ensaios reológicos afectados pela ocorrência de deslizamento traduz-se, na prática, pela consideração de valores da viscosidade inferiores aos reais numa gama mais ou menos extensa dos valores das tensões tangenciais ou das velocidades de deformação angular.

Poderão, assim, obter-se diagramas do tipo dos apresentados na *figura 35* em que existe um falso patamar intermédio pseudo-Newtoniano que se mantém muitas vezes constante até valores extremamente reduzidos da velocidade de deformação angular, conduzindo à adopção de viscosidades muito inferiores às realmente existentes no fluido.

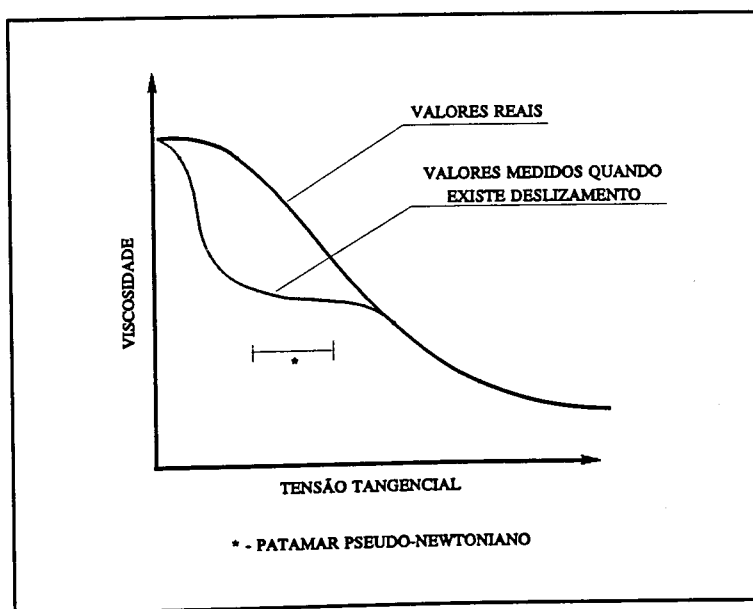


figura 35 – Influência da ocorrência de deslizamento na definição do comportamento reológico dos fluidos (adaptado de Barnes [5]).

No caso de suspensões muito floculentas, os valores da viscosidade podem, para valores muito baixos da velocidade de deformação angular, convergir para infinito levando, assim, a considerar um valor falso para a tensão de cedência do fluido ou, mesmo, a admitir, erradamente, a existência dessa tensão em fluidos com características reológicas simplesmente viscosas.

Durante a realização dos ensaios reológicos, consegue-se minimizar ou, mesmo, evitar a ocorrência de deslizamento, tomando algumas precauções especiais.

Assim, quando se utilizam cilindros concêntricos, a escolha de cilindros com uma superfície rugosa em contacto com o fluido pode impedir a ocorrência de deslizamento.

Em alternativa, a realização dos ensaios, na gama das baixas velocidades de deformação angular, com o dispositivo indicado para a realização do "*vane test*", permite eliminar os efeitos associados ao deslizamento.

No caso de tubos viscométricos, conseguem-se reduzir, significativamente, as interferências do deslizamento nos valores medidos aumentando o diâmetro dos tubos.

Por último, importa referir que, quando ocorre deslizamento nos ensaios reológicos com um determinado fluido, este fenómeno poderá, também, condicionar o seu escoamento em condutas.

A ocorrência de deslizamento no transporte de um fluido em condutas é, no entanto, um factor positivo pois permite reduzir os valores previstos para as perdas de carga o que, no caso de uma estação elevatória, permite aumentar o caudal bombado e reduzir a altura manométrica de elevação do grupo electro-bomba.

5. ESCOAMENTO DAS LAMAS

No presente **Capítulo** são referidos os aspectos essenciais envolvidos no escoamento sob pressão dos fluidos em condutas.

Tendo em vista um correcto enquadramento dos conceitos abordados, apresentam-se previamente, de uma forma genérica, as equações que servirão de base à análise do movimento dos fluidos.

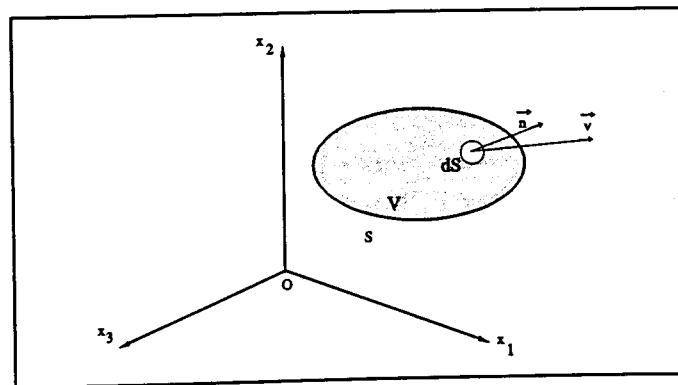
Esta apresentação abrange, apenas, os elementos considerados mais importantes para a posterior compreensão dos conceitos associados à análise do movimento dos fluidos em condutas sob pressão e não dispensa, por isso, o conhecimento dos conceitos fundamentais da *Mecânica dos Fluidos* que se consideram reproduzidos na bibliografia da especialidade – Novais-Barbosa [60], Govier et al [29], Skelland [75] e White [88].

5.1. EQUAÇÕES GERAIS APLICÁVEIS AOS ESCOAMENTOS SOB PRESSÃO

5.1.1. Equação de Continuidade

A *equação de continuidade*, também designada por *princípio da conservação da massa*, traduz a propriedade geral da conservação da massa durante o movimento de um fluido.

Considere-se, então, no caso mais geral, um volume elementar V , limitado por uma superfície fechada S , localizado no interior de um domínio fluido em movimento, de acordo com o esquema apresentado na *figura 36*.



*figura 36 – Volume elementar localizado no interior de um domínio fluido
(adaptado de Novais-Barbosa [60]).*

O princípio geral da conservação da massa pode ser traduzido, então, pela seguinte equação:

$$\frac{dm}{dt} = \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_S \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = 0 \quad (61)$$

Após um adequado tratamento matemático e atendendo a que o volume V é totalmente arbitrário, a equação (61) pode escrever-se na seguinte forma:

$$\text{div}(\rho \vec{v}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (62)$$

A aplicação da equação (62) ao escoamento sob pressão de um fluido no interior de uma conduta de secção circular, pode ser efectuada considerando o volume localizado na conduta entre as secções S_1 e S_2 , de acordo com o esquema apresentado na *figura 37*.

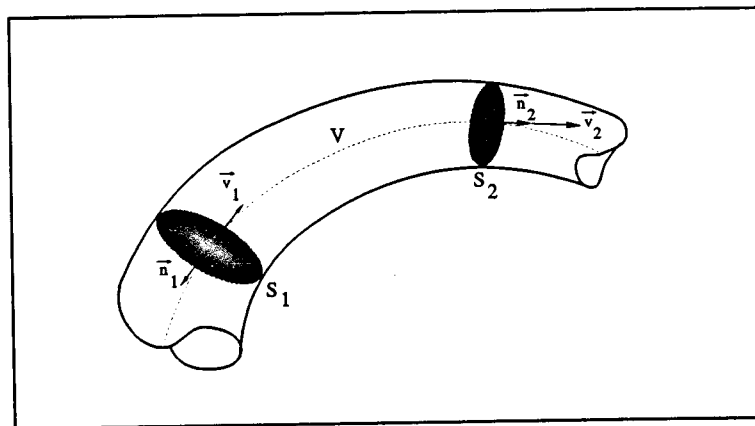


figura 37 – Aplicação da equação de continuidade ao escoamento sob pressão numa conduta.

Nestas condições, a equação de continuidade assume a forma:

$$\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{S_1} \rho (\vec{v}_1 | \vec{n}_1) dS_1 + \int_{S_2} \rho (\vec{v}_2 | \vec{n}_2) dS_2 = 0 \quad (63)$$

Dado que:

$$1) \quad \vec{v}_1 = -v_1 \vec{n}_1 ; \quad (64)$$

$$2) \quad \vec{v}_2 = v_2 \vec{n}_2 ; \quad (65)$$

e considerando o escoamento em regime permanente, a equação (63) pode ser escrita da forma seguinte:

$$\int_{S_1} \rho v_1 dS_1 = \int_{S_2} \rho v_2 dS_2 \quad (66)$$

Concluindo, no caso do escoamento permanente de um fluido pesado e incompressível no interior de uma conduta, a equação de continuidade é a seguinte:

$$Q = \int_S v dS \quad (67)$$

Esta equação exprime, assim, a constância do caudal escoado em qualquer secção da conduta.

5.1.2. Teorema de Bernoulli

O principal objectivo associado à análise do escoamento dos fluidos consiste, normalmente, na determinação da energia dissipada durante o seu movimento.

Num fluido pesado e incompressível, a energia mecânica total de um elemento infinitesimal do fluido é igual ao somatório dos seguintes três elementos:

- **energia potencial de posição**, associada à cota do elemento em relação a um plano horizontal de referência;
- **energia potencial de pressão**, associada à pressão hidrostática existente sobre o elemento de fluido;
- **energia cinética**, associada à velocidade de que se encontra animado o elemento de fluido.

Então, a energia mecânica total por unidade de peso do elemento infinitesimal de fluido pode ser traduzida pela seguinte equação:

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \quad (68)$$

Por sua vez, a dissipação de energia verificada por unidade de peso e de percurso, no elemento infinitesimal de fluido ao longo de uma linha de corrente, pode ser definida a partir da seguinte equação:

$$\frac{\partial}{\partial s} \left(z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \right) = -\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} - j \quad (69)$$

Esta equação, designada por expressão local generalizada do *Teorema de Bernoulli*, traduz a igualdade entre a variação da energia mecânica total do elemento fluido e o somatório do trabalho realizado pelas forças locais de inércia e pelas forças resistentes que se opõem ao movimento desse elemento fluido (forças de atrito). Nesta expressão admitiu-se a inexistência de resistências singulares localizadas e a continuidade de j .

A expressão local generalizada do *Teorema de Bernoulli* pode ser aplicada ao caso do escoamento sob pressão de um fluido no interior de uma conduta. Neste caso, a integração da equação (69) ao longo de uma secção transversal, S , da conduta, acompanhada pela introdução de coeficientes globais que permitam substituir os valores locais dos parâmetros envolvidos por valores globais aplicáveis à referida secção, permite quantificar a variação da energia mecânica total por unidade de peso de um fluido pesado e incompressível escoando-se no interior dessa conduta.

Então, considerando que as energias potenciais de posição e de pressão são referenciadas ao eixo da conduta, obtém-se a seguinte equação:

$$\frac{\partial}{\partial s} \left(z + \frac{bp}{\gamma} + \frac{\alpha U^2}{2g} \right) = -\frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha \cdot U) - J \quad (70)$$

Os coeficientes globais utilizados na equação (70) correspondem, respectivamente, a:

- *b*, *coeficiente de distribuição de pressões*. A consideração do coeficiente *b*, permite definir um valor único para a altura piezométrica (bp/γ) representativo da energia potencial de pressão existente nessa secção. Quando a trajectória dos elementos infinitesimais de fluido é rectilínea e a distribuição de pressões na secção é do tipo hidrostático, pode considerar-se que $b=1$.
- α , *coeficiente de energia cinética ou coeficiente de Coriolis*. A consideração deste coeficiente permite definir um valor único para a energia cinética a partir do valor da velocidade média do escoamento nessa secção. Em geral, quando as fronteiras sólidas do escoamento não são muito rugosas e a sua forma não é muito irregular, pode admitir-se que $\alpha=1$.
- α' , *coeficiente de quantidade de movimento ou coeficiente de Boussinesq*. A consideração deste coeficiente permite definir o trabalho realizado pelas forças locais de inércia a partir do valor da velocidade média na secção. Tal como no caso anterior, quando as fronteiras sólidas não são muito rugosas e a sua forma não é muito irregular, pode admitir-se que $\alpha'=1$.

Por último, refere-se, ainda, que o parâmetro global *J* representa o trabalho realizado pelas forças resistentes, por unidade de peso e de percurso, no interior da conduta.

Quando o escoamento se processa em regime permanente, a componente da dissipação de energia devida às forças globais de inércia anula-se, passando a dissipação de energia a corresponder, apenas, ao trabalho realizado pelas forças de atrito.

Então, considerando que o regime do escoamento é permanente e integrando a expressão global generalizada do *Teorema de Bernoulli* entre duas secções S_1 e S_2 do escoamento no interior de uma conduta, distantes de um comprimento *L*, a equação (70) assume a seguinte forma simplificada:

$$\left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g} \right) = JL \quad (71)$$

É possível generalizar a equação (71) a um escoamento onde exista, para além da dissipação de energia por atrito, dissipação localizada de energia em algumas secções singulares do escoamento e, também, ganhos de energia noutras secções.

Nestas condições, a dissipação total de energia, ΔH , também designada por perda de carga quando o escoamento é sob pressão, é dividida em duas parcelas correspondentes, respectivamente, às perdas de carga contínuas e às perdas de carga localizadas.

A perda de carga contínua existente num trecho de comprimento *L* de uma conduta é traduzida pela equação:

$$\Delta H_{cont} = JL \quad (72)$$

Por sua vez, as perdas de carga localizadas são aplicadas em trechos muito curtos da conduta onde a dissipação de energia não é devida às forças de atrito mas à existência de singularidades (curvas, válvulas, etc).

A perda de carga localizada é, em geral, relacionada com a altura cinética do escoamento através de expressões do tipo:

$$\Delta H_{loc} = K_{loc} \frac{U^2}{2g} \quad (73)$$

Por último, os ganhos de energia ocorrem em secções onde existem equipamentos mecânicos, grupos electro-bomba por exemplo, destinados a aumentar a energia mecânica total existente no escoamento.

Então, a expressão do *Teorema de Bernoulli* aplicada a um trecho de conduta, entre duas secções S_1 e S_2 , constituído por i_1 trechos em que o escoamento é uniforme, separados por i_2 secções onde existem perdas de carga localizadas e i_3 secções onde existem ganhos de energia, pode ser, finalmente, escrita da seguinte forma:

$$\left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g} \right) = \sum_{i=1}^{i_1} (JL)_i + \sum_{i=1}^{i_2} \left(K_{loc} \frac{U^2}{2g} \right)_i - \sum_{i=1}^{i_3} (\Delta B)_i \quad (74)$$

Apresenta-se na *figura 38* uma interpretação gráfica da expressão global do *Teorema de Bernoulli*, aplicada ao escoamento de um fluido numa conduta sob pressão.

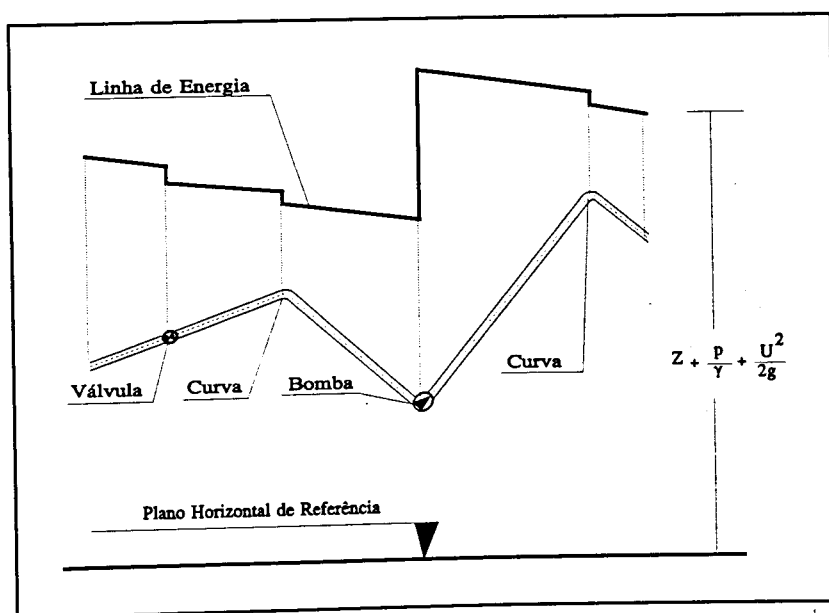
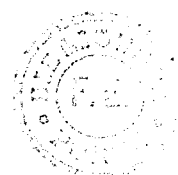


figura 38 – Interpretação gráfica da expressão global do Teorema de Bernoulli aplicada ao escoamento de um fluido numa conduta sob pressão.



5.1.3. Equações de Equilíbrio Dinâmico

As equações de equilíbrio dinâmico resultam da aplicação das equações gerais da dinâmica dos sistemas de partículas ao movimento dos fluidos e traduzem o equilíbrio existente num volume fluido qualquer, V , limitado por uma superfície fluida S , entre as forças de volume (ou de massa), as forças de superfície e as forças de inércia:

$$\int_V \rho \vec{g} dV + \int_S \vec{T}_s(P, \vec{n}, t) dS = \int_V \rho \vec{a}(P, t) dV \quad (75)$$

Considere-se, então, o escoamento permanente de um fluido pesado e incompressível no interior de uma conduta. Neste caso, apresenta-se na *figura 39* o sistema de forças actuantes sobre um volume de fluido limitado entre duas secções, S_1 e S_2 , perpendiculares ao escoamento.

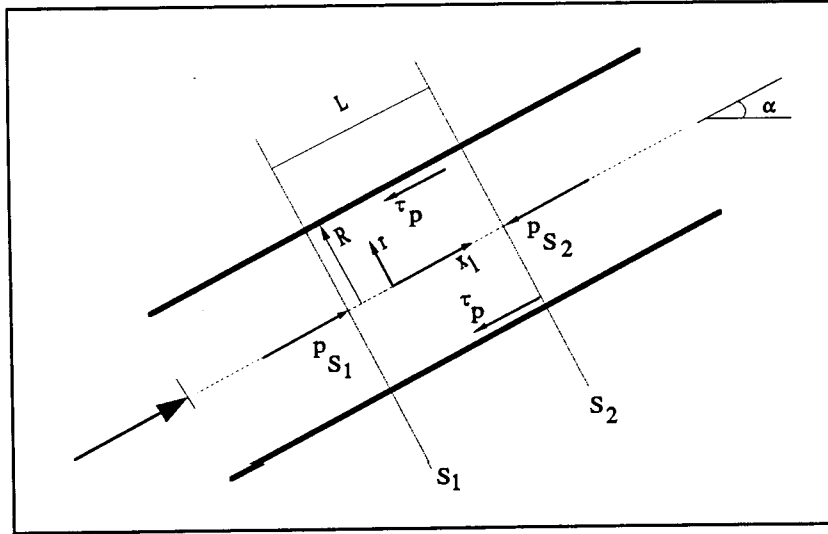


figura 39 – Forças actuantes sobre o volume de fluido existente entre duas secções perpendiculares ao escoamento.

A aplicação da equação de equilíbrio dinâmico ao volume de fluido localizado entre as secções S_1 e S_2 , resume-se à consideração da sua componente segundo a direcção definida pelo eixo da conduta, componente x_1 , no sistema de eixos coordenados considerado.

Nestas condições, os elementos constituintes da equação de equilíbrio dinâmico são traduzidos pelas seguintes equações escalares:

$$1) \int_V \rho g_1 dV = \gamma \pi R^2 L \sin(\alpha) \quad (76)$$

$$2) \int_S T_1(P, n_1, t) dS = \pi R^2 p_{S_1} - \pi R^2 p_{S_2} - 2 \pi R L \tau_p \quad (77)$$

$$3) \int_V \rho a_1(P,t) dV = 0 \quad (78)$$

Considerando estas equações, a aplicação da equação de equilíbrio dinâmico ao escoamento permanente de um fluido no interior de uma conduta, assume, finalmente, a forma:

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} - L \sin(\alpha) = \frac{2L\tau_p}{R\gamma} \quad (79)$$

Esta equação permite calcular a dissipação de energia entre as duas secções consideradas do escoamento. Com efeito, essa dissipação de energia corresponde a uma redução da pressão na conduta traduzida pela seguinte equação:

$$\Delta P = p_1 - (p_2 + L \sin(\alpha) \gamma) \quad (80)$$

Conclui-se, assim, que a dissipação de energia no escoamento pode ser dada pela seguinte expressão:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{2\tau_p}{R} \quad (81)$$

Considerando a pressão constante ao longo de toda a secção transversal do escoamento, a equação (81) pode generalizar-se a qualquer elemento cilíndrico existente no interior do domínio fluido, com raio $r \leq R$, assumindo, então, a seguinte forma:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{2\tau_r}{r} \quad (82)$$

Combinando as equações (81) e (82) verifica-se, então, que:

$$\tau_r = \frac{r}{R} \tau_p \quad (83)$$

Esta equação permite concluir que existe uma variação linear das tensões tangenciais ao longo de qualquer secção transversal ao escoamento, possuindo esta grandeza um valor nulo no eixo da conduta e sendo o seu valor máximo, τ_p , atingido junto à fronteira sólida que limita o escoamento.

Sabendo que, independentemente do regime do escoamento, o perfil de velocidades numa secção transversal tem um comportamento inverso, isto é, varia entre um valor nulo junto às paredes da conduta e um valor máximo no seu eixo, conclui-se que a equação reológica do fluido é do tipo:

$$\frac{dv}{dr} = -f(\tau_r) \quad (84)$$

É interessante, ainda, referir que sendo:

$$1) \quad U_1 = U_2 = U ; \quad (85)$$

$$2) \quad z_1 - z_2 = -L \operatorname{sen}(\alpha) ; \quad (86)$$

a aplicação da equação global do *Teorema de Bernoulli* entre as duas secções limites consideradas, S_1 e S_2 , assume a forma:

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} - L \operatorname{sen}(\alpha) = JL \quad (87)$$

Conclui-se, assim, que a perda de carga unitária, J , pode ser dada pela seguinte expressão:

$$J = \frac{\Delta P}{\gamma L} = \frac{2\tau_p}{\gamma R} \quad (88)$$

5.2. ESCOAMENTOS LAMINARES

Baseando-se nos resultados de experiências realizadas com fluidos *Newtonianos*, *Reynolds* verificou que o escoamento dos fluidos pode ocorrer em regime laminar ou turbulento. Definiu, então, um parâmetro adimensional que permite caracterizar o regime do escoamento qualquer que sejam as condições em que este ocorre. Este parâmetro pode interpretar-se como uma relação entre as forças de inércia e as forças viscosas existentes no escoamento e é designado por número de *Reynolds* sendo dado pelo seguinte equação:

$$Re = \frac{UD\rho}{\mu} \quad (89)$$

Assim, nos escoamentos de fluidos *Newtonianos*, se o número de *Reynolds* não ultrapassar um valor de cerca de **2000 a 2500**, o regime do escoamento é laminar. Nestas condições, o fluido escoa-se em camadas perfeitamente individualizadas, designadas por "lâminas", e não ocorrem perturbações capazes de modificar, rapidamente, as características dos parâmetros envolvidos. Por este motivo, os escoamentos laminares são, em geral, considerados como escoamentos permanentes.

Posteriormente aos estudos de *Reynolds*, os avanços registados no estudo da *Mecânica dos Fluidos* e, sobretudo, na caracterização reológica dos fluidos, permitiram ampliar os conceitos inicialmente formulados por *Reynolds* de modo a incluir todos os fluidos independentemente do seu comportamento reológico.

A caracterização dos escoamentos laminares em condutas engloba, então, actualmente, a definição da **lei do movimento**, da **fórmula de resistência** e do **perfil de velocidades** qualquer que seja o comportamento reológico do fluido.

Apresenta-se, em seguida, a caracterização do escoamento laminar dos fluidos em condutas, em função do seu comportamento reológico, de acordo com os princípios anteriormente referidos.

5.2.1. Lei do Movimento

Considere-se o escoamento laminar de um fluido pesado e incompressível no interior de uma conduta. Apresenta-se, na *figura 40*, o sistema de eixos coordenados que servirá de base à análise efectuada em seguida.

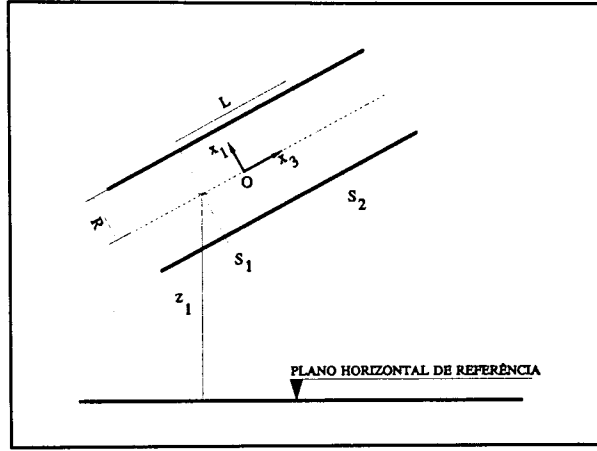


figura 40 – Sistema de eixos coordenados considerados no estudo de escoamentos laminares.

Nas condições referidas na *figura 40*, qualquer que seja a secção do escoamento considerada, o vector velocidade será do tipo:

$$\vec{v} = (v_1, v_2, v_3) = (0, 0, v(r)) \quad (90)$$

Conclui-se, assim, que o escoamento laminar de um fluido numa conduta pode ser analisado escalarmente, uma vez que o vector velocidade tem, localmente, uma direcção paralela ao eixo da conduta.

Quando o escoamento é permanente e o fluido incompressível, a aplicação da equação de continuidade ao escoamento do fluido é traduzida pela seguinte expressão:

$$Q = \int_S \vec{v} \cdot \vec{n} dS = 2\pi \int_0^R v(r) r dr \quad (91)$$

ou, integrando por partes:

$$Q = \pi \left[v(r) r^2 - \int_0^R r^2 dv \right]_0^R \quad (92)$$

Admitindo a condição de não deslizamento junto às fronteiras sólidas do escoamento, verifica-se que $v(R)=0$ e, por isso, a equação (92) assume a forma:

$$Q = -\pi \int_0^R r^2 dv \quad (93)$$

Esta é a expressão generalizada da equação de continuidade aplicada quando o escoamento é laminar.

No escoamento permanente e em regime laminar de um fluido no interior de uma conduta, a equação de continuidade (93) pode, também, ser escrita na forma:

$$Q = -\pi \int_0^{R^2} r^2 \left(\frac{dv}{dr} \right) dr \quad (94)$$

Substituindo nesta equação r^2 e dv/dr de acordo, respectivamente, com as equações (83) e (84), obtém-se:

$$Q = \pi \int_0^{\tau_p} \frac{R^3 \tau_r^2}{\tau_p^3} f(\tau_r) d\tau_r \quad (95)$$

ou, por último:

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{1}{\tau_p^3} \int_0^{\tau_p} \tau_r^2 f(\tau_r) d\tau_r \quad (96)$$

Esta equação constitui a expressão mais generalizada da lei do movimento em regime laminar de um fluido e denomina-se, por isso, **equação geral do movimento em regime laminar**.

Apresenta-se, em seguida, a aplicação da equação generalizada da lei do movimento em regime laminar aos casos particulares dos fluidos sem tensão de cedência, plásticos de *Bingham* e de *Herschell–Bulkley*.

5.2.1.1. Fluidos sem Tensão de Cedência

Sendo os fluidos *Newtonianos* um caso particular dos fluidos cujo comportamento reológico é definido a partir da *lei de potência*, a análise da lei do movimento dos fluidos sem tensão de cedência pode ser efectuada em conjunto, considerando-se, apenas, que na aplicação das equações gerais obtidas ao caso de fluidos *Newtonianos*, os parâmetros reológicos são $K=\mu$ e $n=1$.

A aplicação da *lei de potência*, equação (25), ao escoamento em regime laminar no interior de uma conduta, assume a seguinte forma:

$$f(\tau_r) = \left(\frac{1}{K} \tau_r \right)^{\frac{1}{n}} \quad (97)$$

Substituindo, então, $f(\tau_r)$ na equação geral do movimento em regime laminar, equação (96), obtém-se:

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{1}{K^{\frac{1}{n}} \tau_p^{\frac{3}{n}}} \int_0^{\tau_p} \tau_r^{\frac{2n+1}{n}} d\tau_r \quad (98)$$

Após integração, a equação (98) transforma-se em:

$$Q = \pi R^3 \frac{n}{3n+1} \left(\frac{\tau_p}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (99)$$

Por último, considerando a equação (81), obtém-se:

$$Q = \pi \frac{n}{3n+1} \left(\frac{1}{2K} \frac{\Delta P}{L} \right)^{\frac{1}{n}} R^{\frac{3n+1}{n}} \quad (100)$$

Esta equação é, assim, a lei do movimento em regime laminar de qualquer fluido cujo comportamento reológico seja traduzido pela *lei de potência*.

A aplicação da equação (100) ao caso de um fluido com comportamento reológico *Newtoniano*, conduz à equação de *Hagen-Poiseuille*:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 \mu L} \quad (101)$$

5.2.1.2. Fluidos Plásticos de Bingham

Seguindo uma metodologia idêntica à adoptada em 5.2.1.1., verifica-se que, no caso de fluidos plásticos de *Bingham* e considerando a equação (22), o seu comportamento reológico pode ser descrito a partir da seguinte expressão:

$$f(\tau_r) = \frac{1}{\eta_B} (\tau_r - \tau_c) \quad (102)$$

Nos fluidos plásticos de *Bingham*, para valores da tensão tangencial inferiores aos da tensão de cedência, τ_c , o fluido comporta-se como se se tratasse de um corpo sólido.

Então, admitindo a distribuição linear das tensões na secção da conduta, referida na equação (83), verifica-se que a aplicação desta equação a fluidos plásticos de *Bingham* conduz à separação do escoamento em duas zonas distintas correspondentes, respectivamente, às seguintes condições:

$$1) \quad 0 \leq r \leq r_c; \quad 0 \leq \tau_r \leq \tau_c; \quad f(\tau_r) = 0 \quad (103)$$

$$2) \quad r_c \leq r \leq R; \quad \tau_c \leq \tau_r \leq \tau_p; \quad f(\tau_r) = \frac{1}{\eta_B} (\tau_r - \tau_c) \quad (104)$$

Assim, no escoamento laminar destes fluidos em condutas existe uma zona central do escoamento, com raio $r_c \leq R$, onde o fluido tem um comportamento idêntico ao de um sólido, movendo-se com uma velocidade constante e não existindo, por isso, tensões tangenciais entre superfícies adjacentes.

Considerando a equação (82), o valor de r_c será dado pela seguinte equação:

$$r_c = \frac{2L\tau_c}{\Delta P} \quad (105)$$

Então, neste caso, a lei do movimento em regime laminar, equação (96), assume a forma:

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{1}{\tau_p^3} \int_{\tau_c}^{\tau_p} \tau_r^2 f(\tau_r) d\tau_r \quad (106)$$

Considerando a equação (104), a equação (106) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{1}{\eta_B \tau_p^3} \int_{\tau_c}^{\tau_p} \tau_r^2 (\tau_r - \tau_c) d\tau_r \quad (107)$$

Integrando esta equação entre os respectivos limites de integração, obtém-se:

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{1}{\eta_B} \frac{\tau_p}{4} \left[1 - \frac{4\tau_c}{3\tau_p} + \frac{\tau_c^4}{3\tau_p^4} \right] \quad (108)$$

Por último, substituindo τ_p de acordo com a equação (81), obtém-se:

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{1}{4\eta_B} \left(\frac{D\Delta P}{4L} \right) \left[1 - \frac{4\tau_c}{3} \left(\frac{4L}{D\Delta P} \right) + \frac{\tau_c^4}{3} \left(\frac{4L}{D\Delta P} \right)^4 \right] \quad (109)$$

Esta equação, designada por equação de *Buckingham*, traduz a lei do movimento em regime laminar de qualquer fluido plástico de *Bingham* escoando-se numa conduta de secção circular.

É interessante notar que sendo os fluidos *Newtonianos* um caso particular dos fluidos plásticos de *Bingham*, correspondente, respectivamente a $\tau_c=0$ e $\eta_B=\mu$, verifica-se que, como seria de esperar, a equação (109) é, neste caso, idêntica à equação (101).

5.2.1.3. Fluidos de *Herschell–Bulkley*

Considerando a equação (23), o comportamento reológico dos fluidos de *Herschell–Bulkley* pode ser descrito a partir da seguinte equação:

$$f(\tau_r) = \left(\frac{\tau_r - \tau_c}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (110)$$

Tal como em 5.2.1.2., também neste caso existem as seguintes duas regiões no escoamento:

$$1) \quad 0 \leq r \leq r_c; \quad 0 \leq \tau_r \leq \tau_c; \quad f(\tau_r) = 0 \quad (111)$$

$$2) \quad r_c \leq r \leq R; \quad \tau_c \leq \tau_r \leq \tau_p; \quad f(\tau_r) = \left(\frac{\tau_r - \tau_c}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (112)$$

O valor de r_c é, para estes fluidos, idêntico ao obtido para os fluidos plásticos de *Bingham*, dado pela equação (105).

Então, substituindo $f(\tau_r)$, dado pela equação (112), na equação (106) seguindo uma metodologia idêntica à adoptada em 5.2.1.2., obtém-se:

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{1}{K^{\frac{1}{n}} \tau_p^3} \int_{\tau_c}^{\tau_p} \tau_r^2 (\tau_r - \tau_c)^{\frac{1}{n}} d\tau_r \quad (113)$$

ou, integrando entre os respectivos limites de integração:

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{n}{3n+1} \left(\frac{\tau_p - \tau_c}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \left[1 - \frac{\frac{\tau_c}{\tau_p}}{2n+1} \left[1 + \frac{2n}{n+1} \frac{\tau_c}{\tau_p} \left(1 + n \frac{\tau_c}{\tau_p} \right) \right] \right] \quad (114)$$

Finalmente, substituindo τ_p de acordo com a equação (81), obtém-se:

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{\left(\frac{1}{K} \right)^{\frac{1}{n}}}{\left(\frac{D \Delta P}{4L} \right)^3} \left(\frac{D \Delta P}{4L} - \tau_c \right)^{\frac{1+n}{n}} \left[\frac{\left(\frac{D \Delta P}{4L} - \tau_c \right)^2}{\frac{3n+1}{n}} + \frac{2\tau_c \left(\frac{D \Delta P}{4L} - \tau_c \right)}{\frac{2n+1}{n}} + \frac{\tau_c^2}{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (115)$$

Pode-se verificar, facilmente, que, quando $n=1$, esta equação é idêntica à equação (109) (fluido plástico de *Bingham*) e, por sua vez, quando $\tau_c=0$, esta equação adquire a mesma expressão da equação (100) (*lei de potência*).

Conclui-se, assim, que a equação (115) é a aplicação mais generalizada da equação (96) traduzindo o escoamento em regime laminar de qualquer fluido com comportamento reológico independente do tempo, qualquer que seja o modelo reológico considerado.

5.2.2. Fórmulas de Resistência

Consideram-se fórmulas de resistência, as equações que permitem determinar a perda de carga, J , e, também, considerando a equação (88), a redução de pressão na conduta, $\Delta P/L$, em função das características do escoamento, que se admite uniforme.

Sendo as forças predominantes em regime laminar de natureza viscosa, o escoamento laminar de um fluido numa conduta sob pressão pode ser traduzido por uma equação do tipo:

$$f(D, U, \rho, \tau_c, K, n, \tau_p) = 0 \quad (116)$$

A aplicação da análise dimensional à equação (116), considerando como unidades fundamentais, D , U e ρ , permite obter a seguinte equação generalizada em variáveis adimensionais:

$$f\left(\frac{\tau_c}{\rho U^2}, \frac{D^n U^{(2-n)} \rho}{K}, n, \frac{\tau_p}{\rho U^2}\right) = 0 \quad (117)$$

Sendo n uma constante do fluido independente das condições em que ocorre o escoamento, a equação (117) pode ser escrita na forma:

$$\frac{\tau_p}{\rho U^2} = f\left(\frac{D^n U^{(2-n)} \rho}{K}, \frac{\tau_c}{\rho U^2}\right) \quad (118)$$

Considerando a relação entre J e τ_p indicada na equação (88), a equação (118) assume, então, a forma:

$$J = \frac{1}{D} \frac{4U^2}{g} f\left(\frac{D^n U^{(2-n)} \rho}{K}, \frac{\tau_c}{\rho U^2}\right) \quad (119)$$

Se na equação (119) a função f for substituída por uma função $\lambda=8f$, designada por *coeficiente de perda de carga*, a perda de carga unitária pode ser expressa em função da altura cinética do escoamento a partir da seguinte expressão:

$$J = \frac{1}{D} \frac{U^2}{2g} \lambda \left(\frac{D^n U^{(2-n)} \rho}{K}, \frac{\tau_c}{\rho U^2}\right) \quad (120)$$

Por sua vez, se a função f for substituída por outra função $f_F=2f$, designada por *coeficiente de atrito de Fanning* obtém-se a seguinte expressão para a perda de carga unitária:

$$J = \frac{U^2}{gR} f_F \left(\frac{D^n U^{(2-n)} \rho}{K}, \frac{\tau_c}{\rho U^2}\right) \quad (121)$$

As equações (120) e (121) são equivalentes e representam a **expressão geral das fórmulas de resistência em regime laminar**.

Apresenta-se, em seguida, a aplicação da expressão geral das fórmulas de resistência em regime laminar aos casos particulares dos fluidos sem tensão de cedência, plásticos de *Bingham* e de *Herschell-Bulkley*.

5.2.2.1. Fluidos sem Tensão de Cedência

A aplicação da expressão geral das fórmulas de resistência em regime laminar, equação (120), ao caso de um fluido sem tensão de cedência, $\tau_c=0$, é a seguinte:

$$J = \frac{1}{D} \frac{U^2}{2g} \lambda \left(\frac{D^n U^{2-n} \rho}{K} \right) \quad (122)$$

Conclui-se, assim, que, no caso de fluidos sem tensão de cedência, o coeficiente de perda de carga nos escoamentos laminares é função, apenas, de um parâmetro adimensional do escoamento.

É possível determinar o valor de λ resolvendo, em primeiro lugar, a equação da lei do movimento em regime laminar para este tipo de fluidos, equação (99), em ordem a τ_p :

$$\tau_p = K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{8U}{D} \right)^n \quad (123)$$

Em seguida, substituindo o valor obtido para τ_p na equação (88), obtém-se a equação:

$$J = \frac{1}{D} \frac{U^2}{2g} \frac{64}{Re_g} \quad (124)$$

em que o número de Reynolds generalizado, Re_g , tem a seguinte expressão:

$$Re_g = \frac{\rho U D}{K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{8U}{D} \right)^{(n-1)}} \quad (125)$$

Verifica-se, então, que as equações (122) e (124) são idênticas, concluindo-se, por isso, que para fluidos com comportamento reológico do tipo *lei de potência*, o coeficiente de perda de carga, λ , é dado pela seguinte expressão:

$$\lambda = \frac{64}{Re_g} \quad (126)$$

A equação (124) é, assim, a expressão geral das fórmulas de resistência em regime laminar para fluidos sem tensão de cedência.

A aplicação da equação (124) ao caso particular de um fluido cujo comportamento reológico é *Newtoniano* ($K=\mu$; $n=1$), conduz à seguinte expressão para o coeficiente de perda de carga:

$$\lambda = \frac{64}{\frac{UD\rho}{\mu}} = \frac{64}{Re} \quad (127)$$

Então, quando os fluidos são *Newtonianos* a perda de carga em regime laminar é dada pela expressão:

$$J = \frac{1}{D} \frac{U^2}{2g} \frac{64}{Re} \quad (128)$$

5.2.2.2. Fluidos Plásticos de Bingham

A aplicação da expressão geral das fórmulas de resistência em regime laminar ao caso de fluidos plásticos de *Bingham* resulta numa expressão do tipo:

$$J = \frac{1}{D} \frac{U^2}{2g} \lambda \left(\frac{DU\rho}{\eta_B}, \frac{\tau_c}{\rho U^2} \right) \quad (129)$$

Considerando que a expressão do número de *Reynolds* para fluidos plásticos de *Bingham* é um caso particular da equação (125), quando $K=\eta_B$ e $n=1$, define-se, então, o número de *Reynolds* de *Bingham*, Re_B , igual a:

$$Re_B = \frac{UD\rho}{\eta_B} \quad (130)$$

Por sua vez, multiplicando o segundo parâmetro adimensional da expressão do coeficiente de perda de carga por Re_B^2 , obtém-se outro parâmetro adimensional equivalente, designado por número de *Hedstrom*:

$$He = \frac{\tau_c}{\rho U^2} Re_B^2 = \frac{\rho D^2 \tau_c}{\eta_B^2} \quad (131)$$

Então, no caso de fluidos plásticos de *Bingham*, a expressão da fórmula de resistência pode ser escrita na forma:

$$J = \frac{1}{D} \frac{U^2}{2g} \lambda(Re_B, He) \quad (132)$$

No caso de fluidos plásticos de *Bingham*, é, ainda, possível determinar uma equação para o coeficiente de perda de carga em função dos parâmetros adimensionais Re_B e He , embora já não seja possível apresentar essa equação numa forma explícita, tal como em 5.2.2.1..

Resolvendo, então, em primeiro lugar, a equação da lei do movimento em regime laminar para este tipo de fluidos, equação (108), em ordem a τ_p e considerando $x=\tau_c/\tau_p$ obtém-se:

$$\tau_p = \eta_B \left(1 - \frac{4x}{3} + \frac{x^4}{3} \right)^{-1} \left(\frac{8U}{D} \right) \quad (133)$$

Substituindo, em seguida, o valor obtido para τ_p na equação (88), obtém-se a seguinte equação:

$$J = \frac{1}{D} \frac{U^2}{2g} \frac{64\eta_B}{\rho DU} \left(1 - \frac{4x}{3} + \frac{x^4}{3} \right)^{-1} \quad (134)$$

Comparando esta equação com a equação (132), verifica-se que o coeficiente de perda de carga, λ , para o escoamento em regime laminar de fluidos plásticos de *Bingham* é dado pela seguinte expressão:

$$\lambda = \frac{64 \eta_B}{\rho D U} \left(1 - \frac{4x}{3} + \frac{x^4}{3} \right)^{-1} \quad (135)$$

Por último, pode-se, ainda, exprimir esta equação em função dos números adimensionais Re_B e He obtendo-se:

$$\lambda = \frac{64}{Re_B} \left(1 - \frac{32 He}{3 \lambda Re_B^2} + \frac{8^4 He^4}{3 \lambda^4 Re_B^8} \right)^{-1} \quad (136)$$

ou seja:

$$\frac{1}{Re_B} = \frac{\lambda}{64} - \frac{1}{6} \frac{He}{Re_B^2} + \frac{64}{3} \frac{He^4}{\lambda^3 Re_B^8} \quad (137)$$

Apresenta-se, na **figura 41**, um ábaco, obtido a partir da equação (137), onde se poderá obter o valor do coeficiente de perda de carga em função do número de Reynolds de Bingham, para vários valores do número de Hedstrom.

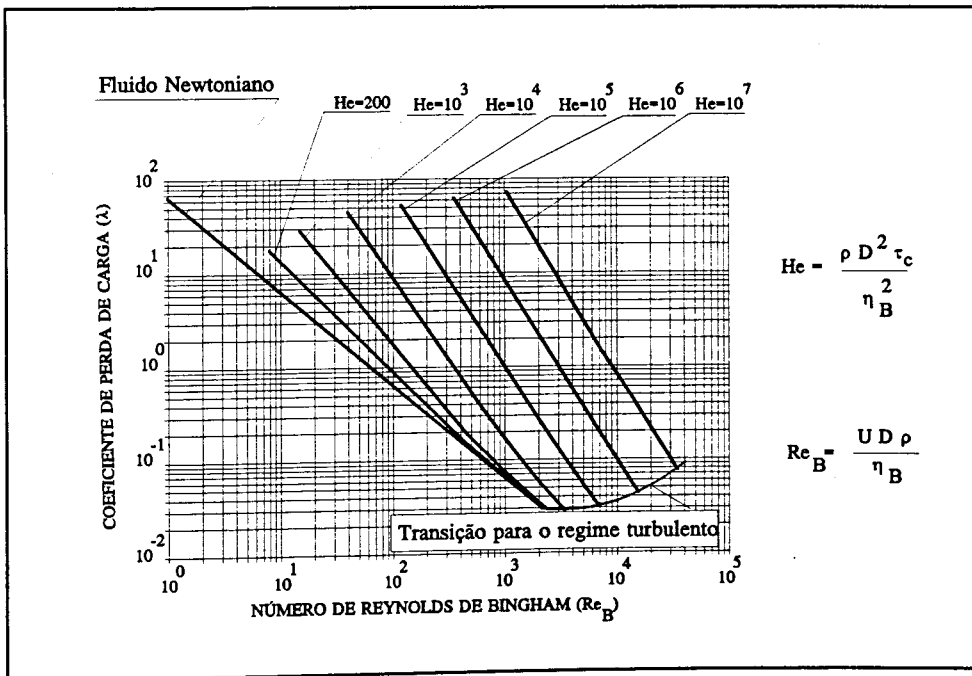


figura 41 – Coeficiente de perda de carga para escoamentos laminares de fluidos plásticos de Bingham.

5.2.2.3. Fluidos de Herschell–Bulkley

As fórmulas de resistência deduzidas em 5.2.2.1. e em 5.2.2.2., respectivamente para fluidos sem tensão de cedência e para fluidos plásticos de Bingham, podem considerar-se casos particulares das expressões mais

generalizadas aplicadas a fluidos de *Herschell–Bulkley*, no primeiro caso quando $\tau_c=0$ e, no segundo caso, quando $n=1$.

Quando o comportamento reológico do fluido é do tipo *Herschell–Bulkley*, a aplicação da metodologia seguida em 5.2.2.1. e em 5.2.2.2. para dedução das fórmulas de resistência, conduz a equações extremamente complexas que inviabilizam a sua aplicação prática.

Por este motivo, no caso dos fluidos de *Herschell–Bulkley*, opta-se, normalmente, por resolver a equação (114) por iterações sucessivas aplicando, em seguida, o valor obtido para τ_p na equação (88) obtendo-se, assim, a perda de carga unitária na conduta.

Refere-se, no entanto, que no caso de fluidos de *Herschell–Bulkley*, é legítimo admitir que o coeficiente de perda de carga pode ser dado por uma equação do tipo:

$$\lambda(Re_g, He) = \lambda \left[\frac{\rho U D}{K \left(\frac{3n+1}{4n} \right) \left(\frac{8U}{D} \right)^{(n-1)}}, \frac{D^2 \tau_c \rho}{\eta_B^2} \right] \quad (138)$$

Esta equação representa, então, uma síntese entre as equações deduzidas para os coeficientes de perda de carga no caso de fluidos sem tensão de cedência e fluidos plásticos de *Bingham*.

5.2.2.4. Método Generalizado de Metzner e Reed

Partindo da equação geral do movimento em regime laminar, equação (96), multiplicando-a por τ_p^3 e diferenciando ambos os membros em ordem a τ_p , com utilização da regra de *Leibniz* para diferenciação de um integral, obtém-se:

$$\left(\frac{dv}{dr} \right)_p = \frac{3}{4} \left(\frac{4Q}{\pi R^3} \right) + \frac{\tau_p}{4} \frac{d \left(\frac{4Q}{\pi R^3} \right)}{d\tau_p} \quad (139)$$

Considerando, agora, a relação existente entre a dissipação de energia e as tensões tangenciais junto à fronteira sólida, traduzida, matematicamente, pela equação (81), verifica-se que a velocidade de deformação angular junto à fronteira sólida, $(dv/dr)_p$, pode ser expressa através da seguinte expressão:

$$\left(\frac{dv}{dr} \right)_p = \frac{3}{4} \left(\frac{8U}{D} \right) + \frac{D \Delta P}{4L} \frac{d \left(\frac{1}{4} \frac{8U}{D} \right)}{d \left(\frac{D \Delta P}{4L} \right)} \quad (140)$$

Esta equação, designada por equação de *Rabinowitsch–Mooney*, é, normalmente, apresentada na seguinte forma:

$$\left(\frac{dv}{dr}\right)_p = \frac{1 + 3n'}{4n'} \frac{8U}{D} \quad (141)$$

em que n' , é igual a:

$$n' = \frac{d \ln\left(\frac{D \Delta P}{4L}\right)}{d \ln\left(\frac{8U}{D}\right)} \quad (142)$$

Já se referiu no, **Capítulo 4**, a importância que as equações (141) e (142) assumem na interpretação dos resultados obtidos nos ensaios reológicos utilizando um reómetro do tipo tubo viscométrico.

Efectivamente, com base nas equações agora apresentadas, é possível concluir que a tensão tangencial junto às paredes sólidas no escoamento laminar de qualquer fluido no interior de uma conduta, pode ser descrita a partir de uma equação do tipo:

$$\tau_p = \bar{K} \left(\frac{8U}{D}\right)^{\bar{n}} \quad (143)$$

Esta equação é semelhante à *lei de potência* embora tenha um significado diferente, pois só é válida para o valor da tensão tangencial junto à fronteira sólida do escoamento e os parâmetros $\bar{K}$ e $\bar{n}$ são função das propriedades reológicas do fluido.

Baseando-se na equação (143), Metzner e Reed desenvolveram uma metodologia generalizada para cálculo das perdas de carga unitárias no escoamento laminar em condutas.

Então, resolvendo em primeiro lugar a equação (120) em ordem a λ e substituindo, em seguida, o valor de J de acordo com a equação (88), verifica-se que o coeficiente de perda de carga pode ser dado pela seguinte equação:

$$\lambda = \frac{8\tau_p}{\rho U^2} \quad (144)$$

Considerando, agora, a equação generalizada (143), a equação (144) transforma-se em:

$$\lambda = \frac{8\bar{K}}{\rho U^2} \left(\frac{8U}{D}\right)^{\bar{n}} \quad (145)$$

Atendendo à semelhança existente entre a equação generalizada (143) e a *lei de potência*, Metzner e Reed concluíram que o coeficiente de perda de carga podia ser expresso em função de um número adimensional, designado por número de Reynolds de Metzner e Reed, Re_{MR} , da seguinte forma:

$$\lambda = \frac{64}{Re_{MR}} \quad (146)$$

Então, igualando os valores de λ dados pelas equações (145) e (146) obtém-se a seguinte expressão para o número de *Reynolds* de *Metzner e Reed*, Re_{MR} :

$$Re_{MR} = \frac{D^{\bar{n}} U^{(2-\bar{n})} \rho}{8^{(\bar{n}-1)} \bar{K}} \quad (147)$$

Conclui-se, assim, que existe uma metodologia genérica, aplicável a qualquer fluido independentemente do seu comportamento reológico, que permite determinar o coeficiente de perda de carga a partir do conhecimento dos parâmetros $\bar{K}$ e $\bar{n}$, que se definem, em função do comportamento reológico do fluido, da seguinte forma:

– fluidos pseudoplásticos:

$$1) \quad \bar{n} = n ; \quad (148)$$

$$2) \quad \bar{K} = K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n . \quad (149)$$

– fluidos plásticos de *Bingham*:

$$1) \quad \bar{n} = \left(1 - \frac{4x}{3} + \frac{x^4}{3} \right) (1 - x^4)^{-1} \quad (150)$$

$$\bar{K} = \tau_p \left[\left(\frac{n}{\tau_p} \right)^{\bar{n}} \left(1 - \frac{4x}{3} + \frac{x^4}{3} \right)^{-\bar{n}} \right] \quad (151)$$

No caso de fluidos de *Herschell–Bulkley* verifica-se que as equações adquirem uma grande complexidade que inviabiliza a sua aplicação prática. Por isso, recorre-se, em geral, aos processos iterativos referidos em 5.2.2.3. para determinar o valor do coeficiente de perda de carga e, em seguida, a própria perda de carga unitária.

5.2.3. Perfil de Velocidades

Quando o regime do escoamento é laminar é possível deduzir a equação do perfil de velocidades em qualquer secção do escoamento.

Apresenta-se, em seguida, a determinação dos perfis de velocidades em regime laminar para os fluidos sem tensão de cedência, plásticos de *Bingham* e de *Herschell–Bulkley*.

5.2.3.1. Fluidos sem Tensão de Cedência

Considerando a equação (84) e substituindo na equação (97) o valor de τ_r dado pela equação (83), obtém-se a seguinte equação:

$$dv = \left(-\frac{r}{KR} \tau_p \right)^{\frac{1}{n}} dr \quad (152)$$

Integrando esta equação, obtém-se:

$$v(r) = -\frac{n}{n+1} \left(\frac{\tau_p}{KR} \right)^{\frac{1}{n}} r^{\frac{n+1}{n}} + C_1 \quad (153)$$

A constante de integração C_1 pode ser definida a partir da condição fronteira, $v(R)=0$.

Conclui-se, assim, que a distribuição de velocidades em qualquer secção transversal do escoamento pode ser dada pela seguinte equação:

$$v(r) = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\tau_p}{K} \right)^{\frac{1}{n}} R \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (154)$$

ou, considerando a equação (81):

$$v(r) = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\Delta P}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} R^{\frac{n+1}{n}} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (155)$$

Esta é a equação do perfil de velocidades no escoamento laminar de qualquer fluido com um comportamento reológico do tipo *lei de potência*.

A aplicação da equação (155) ao caso particular de um fluido *Newtoniano*, conduz à seguinte equação:

$$v(r) = \frac{\Delta P}{4\mu L} R^2 \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (156)$$

Esta equação representa um parabolóide de revolução e, por isso, o perfil de velocidades no escoamento em regime laminar de um fluido *Newtoniano* tem uma configuração parabólica.

Sendo a velocidade máxima do escoamento, no centro da conduta ($r=0$), dada pela equação:

$$v_{máx} = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\Delta P}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} R^{\frac{n+1}{n}} \quad (157)$$

Então, o perfil de velocidades dos fluidos sem tensão de cedência pode ser representado, numa forma adimensional, pela seguinte equação:

$$\frac{v(r)}{v_{máx}} = 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \quad (158)$$

Considerando o gradiente de velocidades junto à fronteira sólida, $(dv/dr)_p$, dado pela equação (141) e sabendo que, para fluidos sem tensão de cedência, $n=n$, a relação entre as velocidades máximas do escoamento deste tipo de fluidos e dos fluidos *Newtonianos* ($n=1$), pode ser dada pela seguinte equação:

$$\frac{(v_{máx})_n}{(v_{máx})_{n=1}} = \frac{1+3n}{2(n+1)} \quad (159)$$

Utilizando o sistema de eixos coordenados $(r/R ; v/(v_{máx})_{n=1})$, apresentam-se, então, na **figura 42**, o perfil de velocidades, para vários valores de n , em fluidos cujo comportamento reológico pode ser descrito por uma lei do tipo *lei de potência*. Note-se que, quando $n=1$, o perfil de velocidades corresponde a fluidos com um comportamento reológico *Newtoniano*.

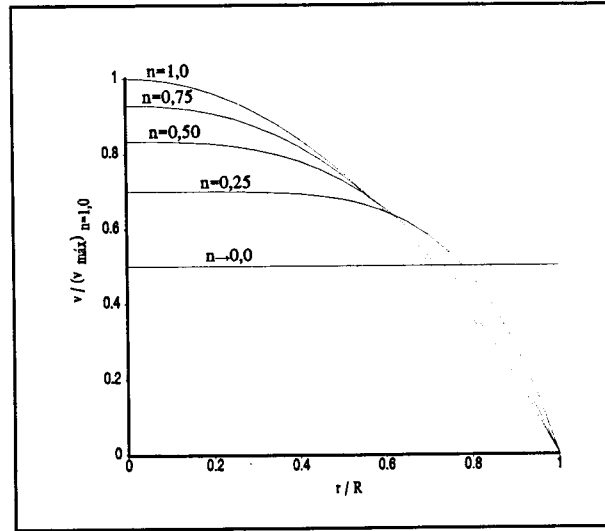


figura 42 – Perfil de velocidades em fluidos cujo comportamento reológico é do tipo *lei de potência* (adaptado de Govier et al [29]).

5.2.3.2. Fluidos Plásticos de Bingham

Tal como para os fluidos sem tensão de cedência, também neste caso é possível deduzir a equação do perfil de velocidades em qualquer secção do escoamento.

Considerando a equação (84) e substituindo o valor de τ_r , dado pela equação (83) na equação (102), obtém-se:

$$dv = \frac{1}{\eta_B} \left(\tau_c - \frac{r}{R} \tau_p \right) dr \quad (160)$$

Integrando esta equação e substituindo τ_p segundo a equação (81), obtém-se:

$$v(r) = \frac{1}{\eta_B} \left(r\tau_c - \frac{r^2 \Delta P}{4L} \right) + C_1 \quad (161)$$

Definindo a constante de integração a partir da condição fronteira, $v(R)=0$, conclui-se que, quando $r_c \leq r \leq R$, o perfil de velocidades é dado pela seguinte equação:

$$v(r) = \frac{1}{\eta_B} \left[\frac{\Delta P}{4L} (R^2 - r^2) - \tau_c (R - r) \right] \quad (162)$$

Por sua vez, quando $0 \leq r \leq r_c$, o fluido move-se como se fosse um cilindro sólido com raio r_c e com uma velocidade constante igual à velocidade máxima na secção, dada pela seguinte equação:

$$v_{max} = \frac{1}{\eta_B} \left(\frac{\Delta P}{4L} R^2 - \tau_c R + \frac{L\tau_c^2}{\Delta P} \right) \quad (163)$$

Convém, ainda, referir que a aplicação da equação (162) ao caso de um fluido *Newtoniano*, efectuando as alterações anteriormente referidas, conduz a uma equação idêntica à equação (156).

Então, utilizando o sistema de eixos coordenados $(r/R; v/(v_{max})_{\tau_c=0})$, apresenta-se, na *figura 43*, o perfil de velocidades para vários valores de τ_c/τ_p , em fluidos cujo comportamento reológico pode ser descrito por uma lei do tipo plástico de *Bingham*. Note-se que, quando $\tau_c=0$, o perfil de velocidades corresponde, naturalmente, ao de um fluido *Newtoniano*.

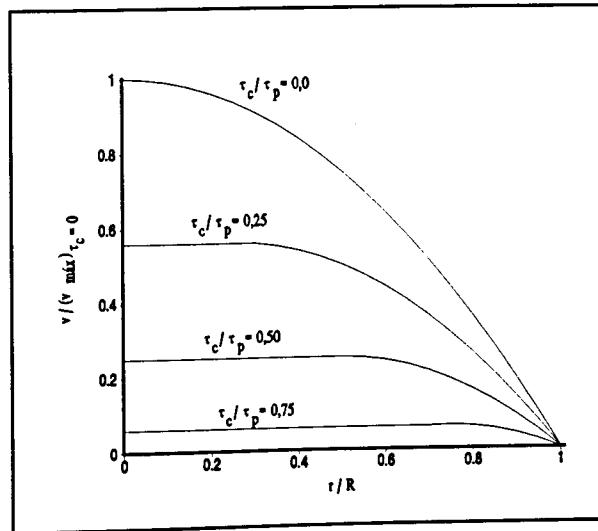


figura 43 – Perfil de velocidades em fluidos cujo comportamento reológico é do tipo plástico de Bingham (adaptado de Govier et al [29]).

5.2.3.3. Fluidos de Herschell–Bulkley

Tal como nos casos anteriores, também neste caso é possível definir a equação do perfil de velocidades em qualquer secção do escoamento.

Assim, considerando a equação (84) e substituindo o valor de τ_r dado pela equação (83) na equação (110), obtém-se:

$$dv = -\left(\frac{1}{RK}\right)^{\frac{1}{n}} (r\tau_p - R\tau_c)^{\frac{1}{n}} dr \quad (164)$$

Integrando esta equação, obtém-se:

$$v(r) = -\frac{n}{n+1} \frac{1}{\tau_p} \left(\frac{1}{RK}\right)^{\frac{1}{n}} (r\tau_p - R\tau_c)^{\frac{n+1}{n}} + C_1 \quad (165)$$

Calculando a constante de integração, C_1 , a partir da condição fronteira $v(R)=0$ e substituindo τ_p de acordo com a equação (81), obtém-se a seguinte equação, válida quando $r_c \leq r \leq R$:

$$v(r) = \frac{n}{n+1} \left(\frac{1}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{2L}{\Delta P} \left[\left(\frac{R\Delta P}{2L} - \tau_c\right)^{\frac{n+1}{n}} - \left(\frac{r\Delta P}{2L} - \tau_c\right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (166)$$

Por sua vez, tal como no caso dos fluidos plásticos de *Bingham*, a velocidade máxima na secção é atingida numa zona central do escoamento, quando $0 \leq r \leq r_c$, sendo dada pela seguinte equação:

$$v_{máx} = \frac{n}{n+1} \left(\frac{1}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{2L}{\Delta P} \left(\frac{R\Delta P}{2L} - \tau_c\right)^{\frac{n+1}{n}} \quad (167)$$

Não se efectua, neste caso, a representação gráfica do perfil de velocidades porque, devido à existência de três parâmetros reológicos (K , n , τ_c), só seria possível uma representação tridimensional. Refere-se, no entanto, que a *figura 42* e a *figura 43*, que representam em coordenadas adimensionais, respectivamente, os perfis de velocidades para fluidos sem tensão de cedência e para fluidos plásticos de *Bingham*, são casos particulares dos perfis de velocidades dos fluidos de *Herschell–Bulkley* correspondentes às situações em que $\tau_c=0$ e $n=1$.

5.3. TRANSIÇÃO DOS ESCOAMENTOS LAMINARES PARA OS TURBULENTOS

A transição do regime laminar para o turbulento acontece quando, no escoamento, as linhas de corrente, que em regime laminar são rectilíneas e paralelas, começam progressivamente a encurvar-se dando origem a turbilhões que se propagam aleatoriamente no interior do domínio fluido.

Assim, o escoamento considera-se em transição do regime laminar para o turbulento quando os vórtices gerados devido ao encurvamento das linhas de corrente são rapidamente dissipados no interior do próprio escoamento. Por sua vez, atinge-se o limite superior da zona de transição quando se verifica que as perturbações no escoamento, devidas à formação de vórtices, têm tendência a amplificar-se propagando-se a todo o domínio fluido.

Quando o fluido é *Newtoniano*, definem-se, normalmente, dois números de *Reynolds* críticos, designados, respectivamente, por número de *Reynolds* crítico inferior – Re_{c1} – e número de *Reynolds* crítico superior – Re_{c2} – correspondentes, o primeiro, ao instante em que termina o regime laminar e, o segundo, ao instante em que começa o regime turbulento.

Assim, em condições normais, nos escoamentos de fluidos *Newtonianos* $Re_{c1}=2100$ e, por sua vez, $Re_{c2}=3000$.

Quando o fluido tem características reológicas não *Newtonianas*, a definição da transição é bastante mais complexa pois, para além de existirem poucos estudos experimentais, o comportamento reológico do fluido é definido por mais do que um parâmetro.

Para estes fluidos, *Ryan e Johnson* desenvolveram um critério baseado na relação entre as forças de inércia (associadas à vorticidade própria dos movimentos turbilhonares) e as forças viscosas (associadas ao amortecimento da vorticidade no interior do domínio fluido). Com base neste critério, estes autores definiram um parâmetro adimensional, designado por parâmetro de estabilidade de *Ryan e Johnson*, válido para todos os fluidos independentemente do seu comportamento reológico e definido pela seguinte equação:

$$Z = - \frac{\rho \nu R}{\tau_p} \left(\frac{dv}{dr} \right) \quad (168)$$

Considerando o sistema de eixos coordenados indicado na *figura 40* e sabendo que, qualquer que seja o regime do escoamento, $v(R)=0$ e $(dv/dr)_{r=0}=0$, constata-se que o valor do parâmetro de estabilidade de *Ryan e Johnson* é nulo junto à fronteira sólida e no eixo da conduta.

Aplicando a equação (168) ao caso particular de um fluido *Newtoniano* e derivando essa equação em ordem a r , de modo a determinar o valor máximo de Z , verifica-se que:

$$Z_{máx} = \frac{2 Re}{3\sqrt{3}} \quad (169)$$

atingindo-se este valor quando:

$$r = \frac{R}{\sqrt{3}} \quad (170)$$

Sabendo que, quando o fluido é *Newtoniano*, a transição tem início para $Re_{c1}=2100$, verifica-se que o valor equivalente quando se utiliza o parâmetro de estabilidade de *Ryan e Johnson* é $(Z_{máx})_{c1}=808$.

Considerando que a equação (168) é generalizada, então o valor de $(Z_{\text{máx}})_{c1}$ obtido para o caso de fluidos *Newtonianos* pode ser aplicado a todos os fluidos independentemente do seu comportamento reológico.

Nestas condições, *Ryan e Johnson* desenvolveram a seguinte expressão para o número de *Reynolds* generalizado crítico, válida para todos os fluidos sem tensão de cedência:

$$(Re_g)_{c1} = \frac{6464 (n+2)^{\left(\frac{n+2}{n+1}\right)}}{(1+3n)^2} \quad (171)$$

Hanks aplicou a metodologia desenvolvida por *Ryan e Johnson* ao caso dos fluidos plásticos de *Bingham* tendo concluído que, para estes fluidos, o número de *Reynolds* de *Bingham* crítico é dado pela expressão:

$$(Re_B)_{c1} = \frac{He}{8x_{c1}} \left(1 - \frac{4x_{c1}}{3} + \frac{x_{c1}^4}{3} \right) \quad (172)$$

Sendo $x = \tau_c / \tau_p$ e o valor de x_{c1} dado pela equação:

$$\frac{x_{c1}}{(1-x_{c1})^3} = \frac{He}{16800} \quad (173)$$

Apresenta-se, na **figura 44**, a relação existente entre o número de *Hedstrom*, **He**, e o número de *Reynolds* de *Bingham* crítico, $(Re_B)_{c1}$.

Analisando o gráfico apresentado na **figura 44** constata-se que a tensão de cedência é um parâmetro de grande importância na definição do instante em que ocorre a transição do regime laminar para o turbulento.

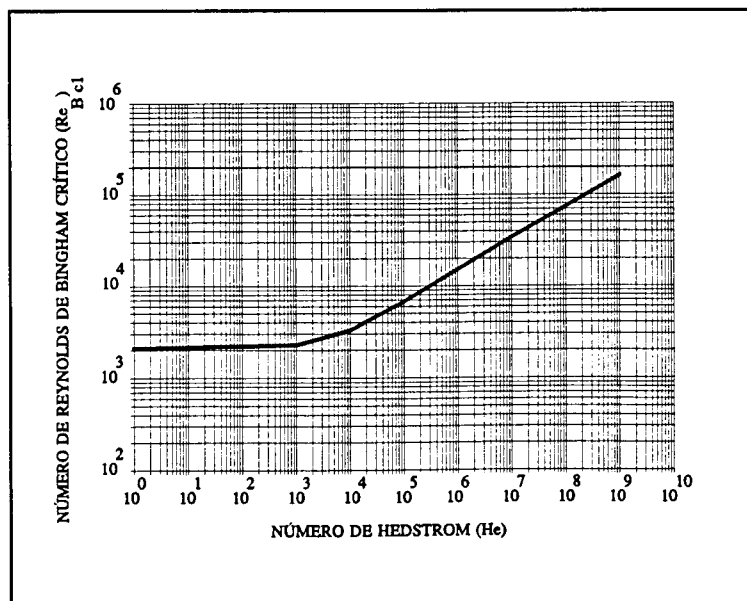


figura 44 – Números de *Reynolds* de *Bingham* críticos em função do número de *Hedstrom*.

Com efeito, é interessante referir que, desprezando, na equação (172), o termo $x_{c1}^{4/3}$ e considerando que, quando se inicia a transição, a tensão tangencial junto à fronteira sólida pode ser dada pela equação:

$$(\tau_p)_{c_1} = \frac{\rho \lambda_{c_1} U_{c_1}^2}{8} \quad (174)$$

a equação (172) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\rho D U_{c_1}}{\eta_B \left(1 + \frac{D \tau_c}{6 \eta_B U_{c_1}} \right)} = \frac{64}{\lambda_{c_1}} \quad (175)$$

Esta expressão é válida para todos os fluidos plásticos de *Bingham* e, por isso, é, também, válida para o caso particular dos fluidos *Newtonianos* sendo, neste caso, $64/\lambda_{c1}=2100$. Então, generalizando a todos os fluidos com comportamento reológico do tipo plástico de *Bingham* e considerando que, nas aplicações práticas, $D\tau_c / 6\eta_B U_{c1} \gg 1$, conclui-se que:

$$U_{c_1} \approx 19 \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} \quad (176)$$

Esta equação aproximada permite verificar que, no caso de fluidos plásticos de *Bingham*, quando $\tau_c > 3 \text{ N/m}^2$ e $\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$, o escoamento só deixa de ser laminar quando a velocidade do escoamento ultrapassa cerca de 1,0 m/s. Por sua vez, mesmo quando a velocidade é de 0,6 m/s, se $\tau_c > 1 \text{ N/m}^2$ o escoamento ocorre em regime laminar.

Estes exemplos demonstram que em fluidos com tensão de cedência é, na prática, muito provável a ocorrência de escoamentos em regime laminar.

Por último, refere-se que *Cheng e Greenley* generalizaram a determinação do número de *Reynolds* em que ocorre a transição ao caso dos fluidos de *Herschell-Bulkley*.

Para estes fluidos, a solução proposta por *Cheng e Greenley* prevê o cálculo do $(Re_g)_{c1}$, por iterações sucessivas, a partir da seguinte equação:

$$(Re_g)_{c_1} = \frac{404(n+2)^{\left(\frac{n+2}{n+1}\right)}}{n(1-x_{c_1})^2} \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^2 \left[1 - \frac{x_{c_1}}{2n+1} \left[1 + \frac{2nx_{c_1}}{n+1} (1 + nx_{c_1}) \right] \right]^{(2-n)} \quad (177)$$

em que:

$$1) \quad x_{c_1} = \frac{\tau_p \left(\frac{2-n}{n}\right) \rho R^2 n}{K^{\frac{2}{n}} (n+1)} \left[(1-x)^{\left(\frac{n+1}{n}\right)} (r'-x)^{\frac{1}{n}} - (r'-x)^{\left(\frac{n+2}{n}\right)} \right] ; \quad (178)$$

e

$$2) \quad r' = \frac{r}{R} = x + \frac{(1-x)}{(n+2)^{\left(\frac{n}{n+1}\right)}} . \quad (179)$$

5.4. ESCOAMENTOS TURBULENTOS

O escoamento de um fluido numa conduta diz-se turbulento a partir do momento em que no seu interior as forças de inércia se sobrepõem às forças viscosas. Nestas condições, o escoamento caracteriza-se pela existência de movimentos turbilhonares no interior do domínio fluido, responsáveis por rápidas flutuações no espaço e no tempo das grandezas que o caracterizam e por uma mistura completa entre as diferentes camadas existentes no interior desse domínio.

Considerando que a condição de não deslizamento junto às fronteiras sólidas é aplicável qualquer que seja o regime do escoamento, conclui-se que nos escoamentos turbulentos existe uma zona nas proximidades das paredes sólidas onde a velocidade assume valores muito reduzidos.

Então, independentemente do comportamento reológico do fluido, um escoamento turbulento plenamente desenvolvido pode ser dividido em três zonas distintas em função da natureza das tensões tangenciais existentes:

- subcamada viscosa;
- zona de transição;
- camada limite turbulenta.

A subcamada viscosa é a zona de muito pequena espessura, localizada junto à fronteira sólida do escoamento onde, devido aos baixos valores existentes para a velocidade, não existe turbulência e, por isso, as tensões viscosas sobrepõem-se às tensões turbulentas.

Por sua vez, a zona de transição é, também, uma zona de muito pequena espessura, localizada entre a subcamada viscosa e a camada limite turbulenta, onde as tensões de natureza viscosa e as tensões de natureza turbulenta são da mesma ordem de grandeza.

Por último, na zona central do escoamento, localiza-se a camada limite turbulenta. Esta zona abrange praticamente todo o escoamento e caracteriza-se pela ocorrência de movimentos turbilhonares perfeitamente aleatórios. Nesta zona, considera-se desprezável a influência da viscosidade do fluido.

Devido à reduzida espessura da subcamada viscosa quando o escoamento é turbulento, a rugosidade das paredes sólidas que limitam o escoamento assume uma importância fundamental na caracterização da forma como ocorre a dissipação de energia.

Com efeito, quando a rugosidade das paredes é significativa, as protuberâncias sólidas podem ter dimensões iguais ou superiores às da própria subcamada viscosa, interferindo deste modo com as características do escoamento aí existentes.

Definem-se, então, três regimes distintos no escoamento turbulento:

- regime turbulento liso;
- regime turbulento de transição liso-rugoso;
- regime turbulento rugoso.

No regime turbulento liso, as asperezas e/ou ondulações existentes na superfície das paredes sólidas que limitam o escoamento são praticamente imperceptíveis, apresentando uma dimensão muito inferior à espessura da subcamada viscosa. São exemplos de materiais que apresentam características deste tipo, os tubos plásticos (PVC, PRFV, polietileno de alta e baixa densidade, etc).

Nestas condições, as tensões tangenciais na zona da subcamada viscosa são, apenas, condicionadas pelas características reológicas evidenciadas pelo fluido.

À medida que a dimensão das asperezas e/ou ondulações da superfície sólida que limita o escoamento aumenta, verifica-se que começam a ocorrer perturbações na subcamada viscosa, motivadas pela interferência das rugosidades, que podem destruir, localmente, as características laminares do escoamento nessa zona.

Nestas condições, o regime do escoamento passa a designar-se por turbulento de transição liso-rugoso. Neste regime, a resistência ao escoamento junto à fronteira sólida, representada pela tensão tangencial, τ_p , é devida, em simultâneo, às tensões tangenciais de natureza viscosa e às rugosidades existentes na parede da conduta.

Atendendo às características intermédias deste regime de escoamento, verifica-se que a sua ocorrência numa determinada conduta não é, apenas, função da dimensão das rugosidades existentes na parede da conduta mas, também, da intensidade da turbulência verificada no escoamento, medida através do respectivo número de *Reynolds*.

Por último, diz-se que o escoamento é turbulento rugoso quando as tensões tangenciais na zona da subcamada viscosa deixam de ser dependentes das características reológicas do fluido.

Neste caso, as tensões tangenciais desenvolvidas são meramente devidas às interferências motivadas pelas rugosidades e considera-se, por isso, que a designação desta zona do escoamento (por subcamada viscosa), embora de uso generalizado, não é a mais apropriada, pois, efectivamente, neste caso, as características reológicas do fluido não condicionam o movimento.

Atendendo às características distintas existentes em cada um dos regimes turbulentos referidos, apresenta-se, em seguida, seguindo uma metodologia idêntica à adoptada para o caso dos escoamentos laminares, a caracterização dos escoamentos turbulentos em condutas para as três situações referidas.

No entanto, devido ao regime turbulento de transição liso-rugoso apresentar características mistas entre o turbulento liso e o rugoso, a apresentação do regime turbulento rugoso antecede a do regime de transição.

Refere-se, por último, que o escoamento turbulento de um fluido numa conduita é considerado, globalmente, como um escoamento homogêneo e isotrópico. Com efeito, embora ocorram grandes flutuações das grandezas a nível local, verifica-se que a nível global o escoamento pode considerar-se bastante estável o que permite realizar a sua análise utilizando, apenas, os valores médios das grandezas.

5.4.1. Regime Turbulento Liso

5.4.1.1. Lei do Movimento

Considerando que, quando os escoamentos são turbulentos as tensões tangenciais existentes são de uma ordem de grandeza muito superior à tensão de cedência (quando existe) do fluido, admite-se, normalmente, que este parâmetro reológico tem uma influência desprezável na definição da lei do movimento. Considera-se, por isso, que a definição da lei do movimento apresentada em seguida é generalizada sendo aplicável a todos os fluidos independentemente do seu comportamento reológico.

Apresenta-se, na *figura 45*, a definição do sistema de eixos coordenados que servirá de base à análise efectuada em seguida.

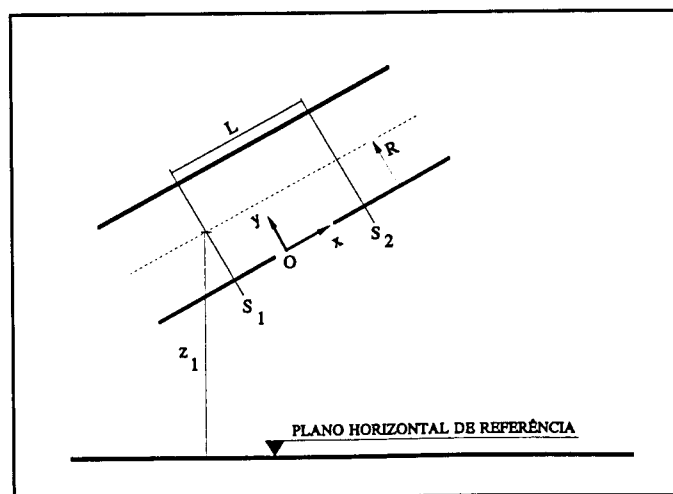


figura 45 – Sistema de eixos coordenados considerado no estudo de escoamentos turbulentos.

Então, utilizando os valores médios locais da velocidade, a aplicação da equação de continuidade ao escoamento do fluido na conduita pode ser expressa na forma:

$$Q = 2\pi \int_0^R v r dr \quad (180)$$

Verifica-se, então, que a lei do movimento em regime turbulento está dependente da definição da velocidade em qualquer secção do escoamento.

Quando o escoamento é turbulento liso, a velocidade a uma distância y da fronteira sólida pode ser determinada por uma equação do tipo:

$$v = f(R, \rho, \tau_p, K, n, y) \quad (181)$$

A aplicação da análise dimensional à equação (181), considerando como unidades fundamentais, R , ρ e τ_p , permite obter a seguinte equação generalizada em coordenadas adimensionais:

$$f\left(\frac{v}{U_*}, \frac{R^n U_*^{(2-n)} \rho}{K}, \frac{y}{R}, n\right) = 0 \quad (182)$$

em que o parâmetro U_* , designado por velocidade de atrito, é igual a:

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_p}{\rho}} \quad (183)$$

Concluindo, a expressão geral da velocidade em regime turbulento liso é a seguinte:

$$\frac{v}{U_*} = f\left(\frac{R^n U_*^{(2-n)} \rho}{K}, \frac{y}{R}, n\right) \quad (184)$$

Embora esta equação seja aplicável a todo o domínio fluido, é, no entanto, possível definir equações simplificadas aplicáveis respectivamente à subcamada viscosa e à camada limite turbulenta.

Com efeito, no caso da subcamada viscosa e atendendo à sua reduzida espessura, pode admitir-se que, nesta região, o movimento é independente do valor do raio da conduta R e, então, a equação (184) reduz-se a:

$$\frac{v}{U_*} = f\left(\frac{\rho U_*^{(2-n)} y^n}{K}, n\right) \quad (185)$$

Por sua vez, na zona central da conduta, designada por camada limite turbulenta, pode admitir-se que a influência da viscosidade é desprezável e, então, pode-se considerar que, neste caso, a equação (181) é independente do coeficiente de consistência, K .

Então, utilizando o conceito de velocidade deficitária, que representa a diferença entre a velocidade máxima, $v_{\max}$, existente no eixo da conduta e a velocidade local em qualquer ponto da camada limite turbulenta, a aplicação da análise dimensional, permite obter a seguinte equação:

$$\frac{v_{m\acute{a}x} - v}{U_*} = f\left(\frac{y}{R}, n\right) \quad (186)$$

Conclui-se, assim, que na camada limite turbulenta a velocidade pode ser dada a partir de uma equação do tipo:

$$v = v_{m\acute{a}x} - U_* f\left(\frac{y}{R}, n\right) \quad (187)$$

As equações (185), (184) e (187) caracterizam, assim, respectivamente, a velocidade em cada uma das três zonas existentes nos escoamentos turbulentos (subcamada viscosa, zona de transição e camada limite turbulenta).

No entanto, atendendo à reduzida espessura da subcamada viscosa e da zona de transição a determinação da lei do movimento em regime turbulento liso é efectuada, normalmente, desprezando a contribuição associada a essas duas zonas e admitindo, assim, que a equação (187) se estende a todo o domínio fluido.

Com este procedimento, generaliza-se o campo de aplicação da lei do movimento, apresentada em seguida, a todos os movimentos turbulentos, independentemente do regime turbulento existente.

Nestas condições, substituindo a equação (187) na equação (180) obtém-se:

$$Q = 2\pi \left(\int_0^R v_{m\acute{a}x} r dr - U_* \int_0^R f\left(\frac{y}{R}, n\right) r dr \right) \quad (188)$$

ou seja:

$$Q = \pi R^2 \left(v_{m\acute{a}x} - \frac{2U_*}{R^2} \int_0^R f\left(\frac{y}{R}, n\right) r dr \right) \quad (189)$$

Então, admitindo que n é constante, para que a equação esteja dimensionalmente correcta deve verificar-se a seguinte relação:

$$\int_0^R f\left(\frac{y}{R}, n\right) r dr = P_n R^2 \quad (190)$$

Representando, P_n uma função adimensional de n .

Conclui-se, assim, que a expressão geral aproximada da lei do movimento em regime turbulento é a seguinte:

$$Q = \pi R^2 (v_{m\acute{a}x} - P_n U_*) \quad (191)$$

Em que, pela definição da equação de continuidade, a velocidade média do escoamento é dada pela expressão:

$$U = v_{m\acute{a}x} - P_n U_* \quad (192)$$

Por outro lado, sabendo que a velocidade é máxima no centro da conduta ($y=R$), a expressão, geral da velocidade, equação (184), reduz-se, neste caso, a:

$$\frac{v_{m\acute{a}x}}{U_*} = f \left(\frac{R^n U_*^{(2-n)} \rho}{K}, n \right) \quad (193)$$

5.4.1.2. Fórmulas de Resistência

Considerando que, quando o regime do escoamento é turbulento liso, a resistência ao escoamento junto às fronteiras sólidas é, apenas, dependente das propriedades reológicas do fluido, a perda de carga unitária, J , tem, neste caso, uma expressão idêntica à obtida para os escoamentos laminares, isto é, são válidas as equações (120) e (121).

Apresentam-se, em seguida, várias metodologias destinadas a calcular o coeficiente de perda de carga em escoamentos turbulentos lisos.

5.4.1.2.1. Fluidos sem Tensão de Cedência

Quando o regime do escoamento é turbulento liso é possível deduzir uma expressão teórica generalizada para determinação do coeficiente de atrito de *Fanning* no caso de fluidos sem tensão de cedência.

Então, substituindo na fórmula de resistência, equação (121), o valor de J dado pela equação (88), obtém-se:

$$\frac{U}{U_*} = \sqrt{\frac{2}{f_F}} \quad (194)$$

Por outro lado, resolvendo a equação (192) em ordem a $v_{m\acute{a}x}/U_*$ e considerando a equação (194), obtém-se a seguinte expressão:

$$\frac{v_{m\acute{a}x}}{U_*} = P_n + \sqrt{\frac{2}{f_F}} \quad (195)$$

Verifica-se, assim, que é possível determinar o coeficiente de atrito de *Fanning* e, conseqüentemente, a perda de carga unitária, a partir do conhecimento da lei do movimento em regime turbulento.

Então, considerando a igualdade:

$$\frac{U}{U_*} = \frac{v_{máx}}{U_*} - \frac{v_{máx} - U}{U_*} \quad (196)$$

Demonstra-se, matematicamente, que a equação (195) é do tipo:

$$\frac{v_{máx}}{U_*} = A_n \ln \left(\frac{\rho R^n U_*^{(2-n)}}{K} \right) + B_n \quad (197)$$

Então, substituindo a equação (197) na equação (195), obtém-se a seguinte expressão para o coeficiente de atrito de *Fanning*:

$$\sqrt{\frac{2}{f_F}} = A_n \ln \left(\frac{\rho D^n U_*^{2-n}}{2^n K} \right) + B_n - P_n \quad (198)$$

Considerando a igualdade:

$$1 = \frac{f_F}{f_F^{\frac{n}{2}}} \frac{f_F^{\frac{n}{2}}}{f_F} = f_F^{(1-\frac{n}{2})} \frac{U^{(2-n)}}{U_*^{(2-n)}} 2^{(\frac{n}{2}-1)} \quad (199)$$

e passando a equação (198) a logaritmos decimais, obtém-se a seguinte equação:

$$\sqrt{\frac{2}{f_F}} = 2,3026 A_n \log \left(\frac{\rho D^n U^{(2-n)}}{K} f_F^{(1-\frac{n}{2})} \right) + 2,3026 A_n \log \left(2^{-(\frac{n}{2}+1)} \right) + B_n - P_n \quad (200)$$

Por sua vez, sabendo que:

$$\frac{\rho D^n U^{(2-n)}}{K} = \frac{1}{8} \left(\frac{6n+2}{n} \right)^n Re_g \quad (201)$$

a equação (200) transforma-se, finalmente, em:

$$\frac{1}{\sqrt{f_F}} = A_{1n} \log \left(Re_g f_F^{(1-\frac{n}{2})} \right) + C_n \quad (202)$$

Esta é a expressão generalizada das fórmulas de resistência em regime turbulento liso aplicável a fluidos sem tensão de cedência.

Na equação (202), os parâmetros A_{1n} e C_n são iguais, respectivamente, a:

$$1) \quad A_{1n} = 1,628 A_n ; \quad (203)$$

$$2) \quad C_n' = A_{1n} \log \left[\frac{1}{8} \left(\frac{6n+2}{n} \right)^n \right] - 0,4901 A_n \left(1 + \frac{n}{2} \right) + \frac{B_n - P_n}{\sqrt{2}} \quad (204)$$

– Fórmula de Dodge e Metzner (1959)

Com base nos resultados experimentais obtidos, *Dodge e Metzner* concluíram, ainda, que as constantes A_{1n} e C_n' são dadas pelas seguintes equações:

$$1) \quad A_{1n} = \frac{4}{n^{0,75}} ; \quad (205)$$

$$2) \quad C_n' = -\frac{0,4}{n^{1,2}} . \quad (206)$$

Substituindo estes valores na equação (202) obtém-se a fórmula de *Dodge e Metzner*:

$$\sqrt{\frac{1}{f_F}} = \frac{4}{n^{0,75}} \log \left(Re_g f_F^{(1-\frac{n}{2})} \right) - \frac{0,4}{n^{1,2}} \quad (207)$$

ou, sabendo que $\lambda = 4f_F$, obtém-se a seguinte equação equivalente:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{2}{n^{0,75}} \log \left(Re_g \lambda^{(1-\frac{n}{2})} \right) - \frac{2}{n^{0,75}} \log \left(4^{(1-\frac{n}{2})} \right) - \frac{0,2}{n^{1,2}} \quad (208)$$

Quando aplicada a fluidos *Newtonianos*, $K=\mu$ e $n=1$, esta equação reduz-se à fórmula de *Prandtl-von Kármán*:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log (Re \sqrt{\lambda}) - 0,8 \quad (209)$$

Dodge e Metzner confirmaram experimentalmente a validade da equação (207) para fluidos com valores de n variáveis entre 0,36 e 1,0 e para valores do Re_g variáveis entre 2900 e 36000.

Apresenta-se, na *figura 46*, um ábaco, em coordenadas logarítmicas, que relaciona o número de *Reynolds* generalizado, Re_g , com o coeficiente de perda de carga, λ , obtido a partir da aplicação da equação de *Dodge e Metzner*.

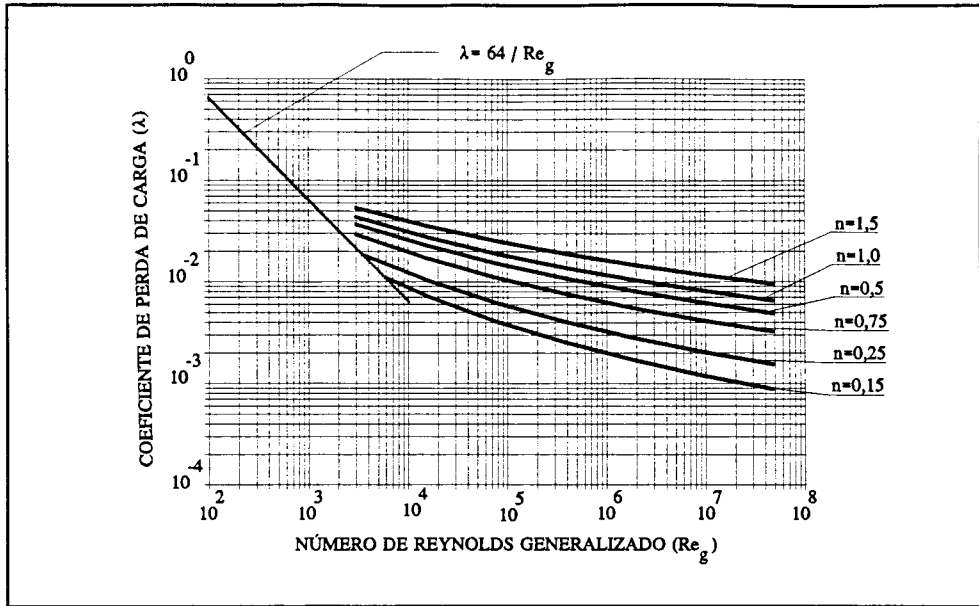


figura 46 – Ábaco de Dodge e Metzner para determinação do coeficiente de perda de carga em escoamentos turbulentos lisos de fluidos sem tensão de cedência.

– Fórmula de Tomita (1959)

Partindo de considerações semelhantes às de Dodge e Metzner, Tomita apresentou a seguinte expressão para a determinação das perdas de carga:

$$\frac{1}{\sqrt{f_{To}}} = 4 \log(Re_{To} \sqrt{f_{To}}) - 0,4 \quad (210)$$

Esta equação apresenta uma estrutura muito semelhante à equação (207), deduzida por Dodge e Metzner, sendo o coeficiente de atrito de Tomita, f_{To} , e o número de Reynolds de Tomita, Re_{To} , dados, respectivamente, pelas seguintes equações:

$$1) \quad f_{To} = \left(\frac{1+2n}{1+3n} \right) \frac{4}{3} f_F ; \quad (211)$$

$$2) \quad Re_{To} = \frac{6 \left(\frac{1+3n}{n} \right)^{(1-n)}}{2^n \left(\frac{1+2n}{n} \right)} 8^{n-1} \left(\frac{1+3n}{4n} \right)^n Re_g . \quad (212)$$

A metodologia proposta por Tomita é, também, aplicável aos escoamentos laminares sendo, neste caso, o coeficiente de atrito de Tomita dado pela equação:

$$f_{To} = \frac{16}{Re_{To}} \quad (213)$$

– Fórmula de Thomas (1960)

A fórmula de *Thomas* resulta da adopção de valores diferentes dos indicados por *Dodge e Metzner* para as constantes A_{1n} e C_n apresentadas na expressão generalizada das fórmulas de resistência em regime turbulento liso, equação (202).

Então, baseando-se nos resultados experimentais obtidos, *Thomas* concluiu que:

$$1) \quad A_{1n} = \frac{4}{n} ; \quad (214)$$

$$2) \quad C_n = \frac{0,4}{n} . \quad (215)$$

Conclui-se, assim, que, neste caso, a equação (202) transforma-se em:

$$\frac{1}{\sqrt{f_F}} = \frac{4}{n} \log \left(Re_g f_F^{\left(1-\frac{n}{2}\right)} \right) - \frac{0,4}{n} \quad (216)$$

– Fórmula de Kemblowski – Kolodziejski (1973)

Com base nos resultados experimentais obtidos em suspensões com características reológicas pseudoplásticas, *Kemblowski e Kolodziejski* propuseram a seguinte metodologia para determinação do coeficiente de atrito de *Fanning*.

Quando $Re_g < 3000$, o escoamento é laminar e, por isso, é aplicável a equação deduzida em 5.2.2.1..

A transição ocorre para valores do número de *Reynolds* generalizado situados entre $3000 < Re_g < 31600 n^{-0,435}$. Neste caso, o coeficiente de atrito de *Fanning* é dado pela seguinte expressão:

$$f_F = \frac{A}{4} \frac{B \frac{1000}{Re_g}}{Re_g^C} \quad (217)$$

em que os parâmetros A , B e C são dados pelas seguintes expressões:

$$1) \quad A = 0,0089 e^{(3,57n^2)} ; \quad (218)$$

$$2) \quad B = e^{\left(\frac{0,572(1-n^{4,2})}{n^{0,435}} \right)} ; \quad (219)$$

$$3) \quad C = 0,314n^{2,3} - 0,064 . \quad (220)$$

Para $Re_g > 31600 n^{-0,435}$, o escoamento é considerado turbulento e, então, aplica-se a seguinte equação:

$$f_F = \frac{0,0791}{Re_g^{0,25}} \quad (221)$$

– **Fórmula de Szilas (1981)**

A fórmula de *Szilas*, tem uma estrutura bastante semelhante à expressão de *Dodge e Metzner*, diferindo, apenas, desta pelos valores adoptados para os coeficientes adimensionais. Assim, *Szilas* propôs a seguinte expressão para calcular o coeficiente de atrito de *Fanning*:

$$\frac{1}{\sqrt{f_F}} = \frac{4}{n} \log \left(Re_g (4f_F)^{(1-\frac{n}{2})} \right) + 1,51^{\frac{1}{n}} \left(4,24 + \frac{1,414}{n} \right) - \frac{8,03}{n} - 2,114 \quad (222)$$

– **Fórmula de Irvine (1988)**

Irvine propôs a seguinte equação explícita para calcular o coeficiente de atrito de *Fanning*:

$$f_F = \frac{F_n}{Re_g^{(\frac{1}{3n+1})}} \quad (223)$$

em que o parâmetro F_n é dado pela seguinte expressão:

$$F_n = \frac{2}{8^{(n-1)}} \left[\frac{8n^n}{7^n(1+3n)^n} \right]^{\frac{1}{3n+1}} \quad (224)$$

5.4.1.2.2. Fluidos Plásticos de Bingham

– **Fórmula de Dodge e Metzner (1959)**

No estudo realizado para a determinação das perdas de carga em regime turbulento liso, *Dodge e Metzner* consideram que a fórmula de resistência deduzida para fluidos sem tensão de cedência pode ser generalizada a qualquer tipo de fluido, desde que se utilize a expressão generalizada da tensão tangencial junto à fronteira sólida, equação (143).

Neste caso, a equação (207) pode ser generalizada a qualquer tipo de fluido escrevendo-se da seguinte forma:

$$\sqrt{\frac{1}{f_F}} = \frac{4}{n^{0,75}} \log \left(Re_{MR} f_F^{(1-\frac{n}{2})} \right) - \frac{0,4}{n^{1,2}} \quad (225)$$

– Fórmula de Tomita (1959)

A partir de resultados obtidos experimentalmente para $2000 < (Re_B)_{To} < 10^5$, utilizando vários fluidos com diferentes valores da tensão de cedência, *Tomita* apresentou a seguinte equação para determinação do coeficiente de atrito de *Tomita*.

$$\frac{1}{\sqrt{(f_B)_{To}}} = 4 \log \left[(Re_B)_{To} \sqrt{(f_B)_{To}} \right] - 0,4 \quad (226)$$

em que:

$$1) \quad (f_B)_{To} = \frac{f_F}{1-x} ; \quad (227)$$

$$2) \quad (Re_B)_{To} = \frac{(1-x)(x^4 - 4x + 3)}{3} Re_B . \quad (228)$$

sendo $x = \tau_c / \tau_p$.

– Fórmula de Thomas (1963)

Thomas propôs a seguinte expressão para determinação do coeficiente de atrito de *Fanning* no caso de fluidos plásticos de *Bingham*:

$$f_F = B Re_B^{-b} \quad (229)$$

Nesta equação, os parâmetros **B** e **b** são dados pelas seguintes equações:

$$1) \quad B = 0,079 \left[\left(\frac{\mu_f}{\eta_B} \right)^{0,48} + \left(\frac{\rho \tau_c K_T^2}{\mu_f^2} \right)^2 \right] ; \quad (230)$$

$$2) \quad b = 0,25 \left[\left(\frac{\mu_f}{\eta_B} \right)^{0,15} + \left(\frac{\rho \tau_c K_T^2}{\mu_f^2} \right)^2 \right] . \quad (231)$$

sendo $K_T = 1,8288 \times 10^6$ m.

– Fórmula de Darby e Melson (1981)

Baseando-se na teoria de comprimento de mistura desenvolvida por *Prandtl*, apresentada em 5.4.1.3., *Hanks e Dadia* realizaram uma análise teórica do escoamento em regime turbulento liso de fluidos plásticos de *Bingham*, tendo proposto um ábaco que relaciona o número de *Reynolds* de *Bingham* com o coeficiente de atrito de *Fanning* para vários valores do número de *Hedstrom* do fluido.

Em regime turbulento liso, a relação apresentada no ábaco de *Hanks e Dadia* para Re_B e f_F , é aproximadamente linear. Baseando-se neste facto e quando $He > 10^4$, *Darby e Melson* propuseram a seguinte expressão para a determinação das perdas de carga:

$$f_F = 10^c Re_B^{-0,193} \quad (232)$$

em que:

$$c = -1,378 \left(1 + 0,146 e^{(-2,9 \times 10^{-5} Re_B)} \right) \quad (233)$$

Apresenta-se, na **figura 47**, a representação gráfica da fórmula de *Darby e Melson* efectuando-se, também, uma comparação com a fórmula de *Dodge e Metzner*, aplicada a fluidos *Newtonianos*. Apresenta-se, ainda, nesta figura, as perdas de carga em regime laminar.

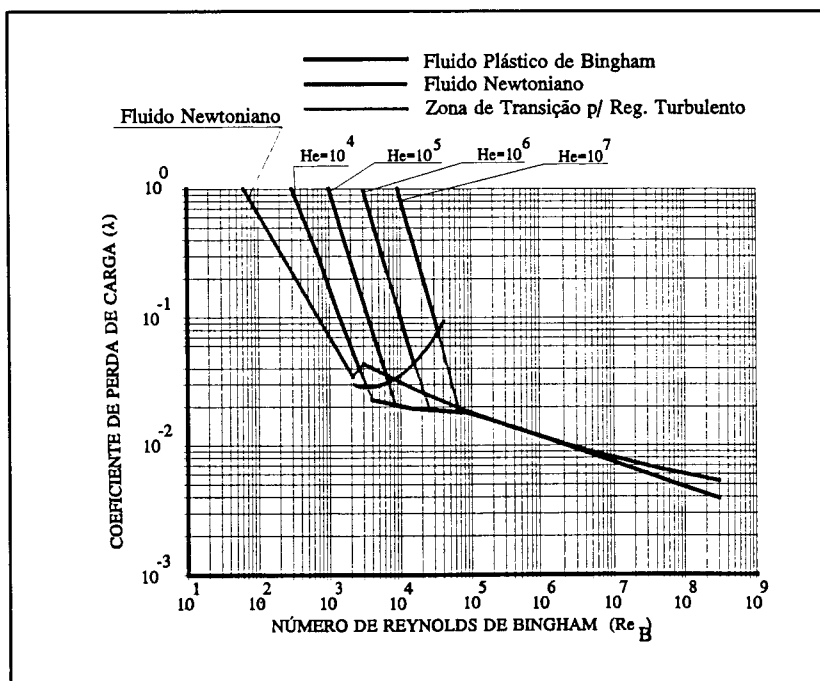


figura 47 – Ábaco para determinação do coeficiente de atrito de Fanning em fluidos plásticos de Bingham.

Verifica-se, assim, que para números de *Hedstrom* muito elevados existe uma zona bastante extensa de transição entre o regime laminar e o turbulento liso que é bastante bem definida a partir das equações propostas para a determinação das perdas de carga em regime laminar.

5.4.1.2.3. Fluidos de *Herschell–Bulkley*

Existem poucos estudos publicados sobre a determinação do coeficiente de perda de carga em regime turbulento, quando o comportamento reológico do fluido é do tipo *Herschell–Bulkley*.

Apresenta-se, assim, apenas, o método proposto por *Torrance (1963)* pois é este o método geralmente aceite como mais representativo do mecanismo da dissipação de energia nos escoamentos turbulentos lisos em fluidos de *Herschell-Bulkley*.

Assim, com base na teoria de comprimento de mistura de *Prandtl*, *Torrance* apresentou a seguinte expressão para o cálculo do coeficiente de atrito de *Fanning*.

$$\frac{1}{\sqrt{f_F}} = 0,45 - \frac{2,75}{n} + \frac{1,97}{n} \ln(1-x) + \frac{1,97}{n} \ln \left(Re_g F_n f_F^{(1-\frac{n}{2})} \right) \quad (234)$$

em que:

$$F_n = \left(\frac{1+3n}{4n} \right)^n \quad (235)$$

sendo $x = \tau_c / \tau_p$.

Esta equação generalizada pode, também, ser aplicada aos casos particulares correspondentes, respectivamente, a fluidos plásticos de *Bingham* ($n=1$) e fluidos sem tensão de cedência ($\tau_c=0$).

Então, aplicando a equação (234) ao caso de um fluido plástico de *Bingham*, obtém-se:

$$\frac{1}{\sqrt{f_F}} = 4,536 \log(1-x) + 4,536 \log(Re_B \sqrt{f_F}) - 2,3 \quad (236)$$

Por sua vez, quando o fluido tem um comportamento reológico do tipo *lei de potência*, obtém-se a seguinte equação para o coeficiente de atrito de *Fanning*:

$$\frac{1}{\sqrt{f_F}} = 0,45 - \frac{2,75}{n} + \frac{1,97}{n} \ln \left(Re_g F_n f_F^{(1-\frac{n}{2})} \right) \quad (237)$$

Para fluidos *Newtonianos* ($n=1$) a equação (237) reduz-se a:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4,536 \log(Re \sqrt{f}) - 2,3 \quad (238)$$

5.4.1.3. Perfil de Velocidades

5.4.1.3.1. Teoria de Prandtl

Quando o regime do escoamento é turbulento liso, a definição do perfil de velocidades é independente do comportamento reológico do fluido e resulta da generalização da teoria do comprimento de mistura desenvolvida por *Prandtl* para o caso de fluidos *Newtonianos*.

Prandtl admitiu que em qualquer ponto do interior do domínio fluido em movimento turbulento, as tensões tangenciais podem ser caracterizadas como um somatório de tensões de natureza viscosa e tensões de natureza turbulenta sendo, por isso, aplicável a seguinte equação:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} + \rho l_m^2 \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (239)$$

O comprimento de mistura, l_m , equivale, assim, à distância média percorrida por um turbilhão numa direcção perpendicular ao escoamento antes de se dissipar.

Considerando que na camada limite turbulenta a influência da viscosidade é desprezável, a equação (239) reduz-se, nesta zona, a:

$$\tau = \rho l_m^2 \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (240)$$

Na formulação da sua teoria, *Prandtl* admitiu que o comprimento de mistura é uma função linear da distância à fronteira sólida, isto é:

$$l_m = ky \quad (241)$$

Considerando, além disso, a equação (83), a equação (240) transforma-se em:

$$\tau_p \left(1 - \frac{y}{R} \right) = \rho \left(ky \frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (242)$$

Prandtl admitiu, ainda, que, em regiões não muito afastadas da fronteira sólida, $y/R \approx 0$ e, então, atendendo à definição de velocidade de atrito, equação (183), obtém-se a seguinte equação aproximada para o perfil de velocidades na camada limite turbulenta:

$$\frac{v}{U_*} = \frac{1}{k} \ln y + C_1 \quad (243)$$

Considerando que, quando $y=R$, $v=v_{\max}$, obtém-se o seguinte valor para a constante de integração, C_1 :

$$C_1 = \frac{v_{\max}}{U_*} - \frac{1}{k} \ln R \quad (244)$$

Concluindo, a equação (243) é do tipo:

$$v^* = A \log y^* + B \quad (245)$$

em que:

$$1) \quad v^* = \frac{v}{U_*} ; \quad (246)$$

$$2) \quad y^+ = \frac{y \rho U_*}{\mu} \quad (247)$$

Prandtl verificou, experimentalmente, que, embora a equação (245) tenha sido deduzida para zonas bastante afastadas do centro da conduta, traduzia, com bastante rigor, as velocidades existentes quando $y^+ > 30$, não sendo, apenas, aplicável no eixo da conduta pois, neste caso, derivando a equação em ordem a y obtém-se um valor para $dv/dy \neq 0$.

A partir dos resultados obtidos, *Prandtl* propôs a seguinte equação para o perfil de velocidades na camada limite turbulenta ($y^+ > 30$) de fluidos *Newtonianos*:

$$u^+ = 2,5 \ln y^+ + 5,5 \quad (248)$$

Por sua vez, na subcamada viscosa as tensões tangenciais de natureza turbulenta são desprezáveis e, por isso, a equação (239) reduz-se a:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (249)$$

Sabendo que a velocidade junto à fronteira sólida do escoamento é nula e atendendo à muito pequena espessura da subcamada viscosa, *Prandtl* admitiu que o perfil de velocidades nessa zona pode considerar-se aproximadamente linear.

Então, seguindo uma metodologia idêntica à apresentada anteriormente para a camada limite turbulenta, obtém-se a seguinte expressão para o perfil de velocidades na subcamada viscosa:

$$(250) \quad v^+ = y^+$$

Com base em resultados experimentais, sabe-se que esta equação é válida, apenas, quando $y^+ < 5$.

Conclui-se, assim, que a zona de transição para fluidos *Newtonianos* corresponde a valores de y^+ situados no intervalo $5 \leq y^+ \leq 30$. Nesta zona, a equação do perfil de velocidades é bastante mais complexa, existindo bastantes expressões empíricas propostas. Refere-se, no entanto, a expressão proposta por *von Kármán*:

$$v^+ = 11,5 \log y^+ - 3,05 \quad (251)$$

5.4.1.3.2. Teoria de Clapp

Partindo da teoria de *Prandtl*, *Clapp* apresentou uma generalização dessa teoria ao caso de fluidos com comportamento reológico do tipo *lei de potência*.

Neste caso, *Clapp* admitiu que a tensão tangencial em qualquer ponto do domínio fluido pode ser dada pela seguinte equação:

$$\tau = K \left(\frac{dv}{dy} \right)^n + \rho l_m^2 \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (252)$$

Então, seguindo uma metodologia idêntica à indicada em 5.4.1.3.1., obtêm-se as seguintes equações para o perfil de velocidades em cada uma das zonas em que se divide o domínio fluido.

– subcamada viscosa ($0 \leq y^+ < 5^n$):

$$v^+ = (y^+)^{\frac{1}{n}} \quad (253)$$

– zona de transição ($5^n \leq y^+ \leq y_2^+$):

$$v^+ = \frac{11,5}{n} \log y^+ - 3,05 \quad (254)$$

– camada limite turbulenta ($y^+ > y_2^+$):

$$v^+ = \frac{A}{n} 2,303 \log y^+ + \frac{B}{n} \quad (255)$$

O parâmetro y_2^+ é uma constante dependente, apenas, das características reológicas do fluido.

Com base em resultados experimentais obtidos, *Deissler* propôs valores para os parâmetros A e B independentes das propriedades reológicas do fluido e iguais, respectivamente, a 2,78 e 3,8.

Apresenta-se, na **figura 48**, em coordenadas adimensionais (x^+ , y^+) o perfil de velocidades em regime turbulento liso. Refere-se que os valores obtidos quando o fluido é *Newtoniano* coincidem com os obtidos aplicando a teoria de *Prandtl*.

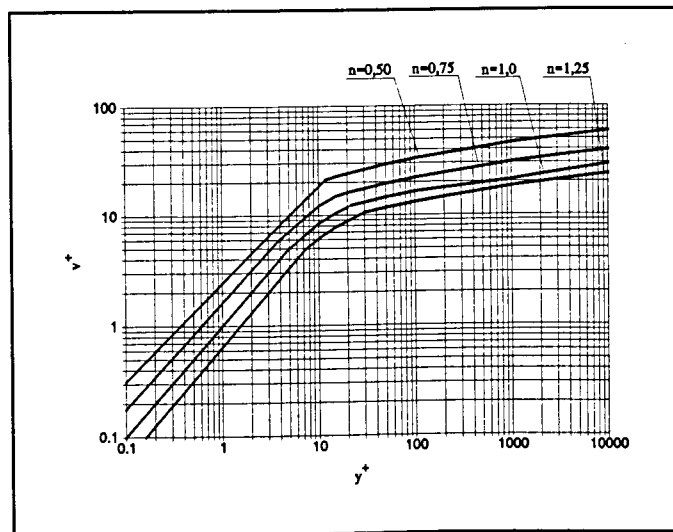


figura 48 – Perfil de velocidades em regime turbulento liso.

5.4.2. Regime Turbulento Rugoso

Em relação aos escoamentos turbulentos lisos, as únicas diferenças verificadas na caracterização do escoamento quando este passa a rugoso ocorrem na subcamada viscosa e na zona de transição.

Assim, nestas zonas, a influência da viscosidade nas tensões tangenciais existentes perde a importância que tinha quando o regime era turbulento liso, passando as tensões a ser dependentes, apenas, das características das rugosidades existentes na superfície interna da conduta.

Por este motivo, a lei do movimento em regime turbulento rugoso é idêntica à deduzida em 5.4.1.1. pois depende, apenas, das características do escoamento na camada limite turbulenta.

Pelo contrário, a fórmula de resistência e o perfil de velocidades na subcamada viscosa e na zona de transição são dependentes das características rugosas da conduta, apresentando-se, por isso, em seguida, uma análise específica para este regime de escoamento.

5.4.2.1. Fórmulas de Resistência

Seguindo uma metodologia idêntica à adoptada em 5.2.4. para os escoamentos laminares, o escoamento turbulento rugoso de um fluido numa conduta pode ser traduzido por uma expressão do tipo:

$$f(D, U, \rho, k_r, \tau_p) = 0 \quad (256)$$

O parâmetro k_r representa a dimensão média das rugosidades e é, por isso, função das características do material da conduta.

Então, aplicando a análise dimensional à equação (256), considerando como unidades fundamentais D , U e ρ e substituindo o valor de τ_p de acordo com a equação (88), seguindo uma metodologia idêntica à descrita em 5.2.4., obtém-se a seguinte equação:

$$J = \frac{1}{D} \frac{U^2}{2g} \lambda \left(\frac{k_r}{D} \right) \quad (257)$$

ou, utilizando o coeficiente de atrito de *Fanning*:

$$J = \frac{U^2}{gR} f_F \left(\frac{k_r}{D} \right) \quad (258)$$

Considerando que a lei do movimento é idêntica à deduzida para os escoamentos turbulentos lisos e seguindo uma metodologia idêntica à adoptada em 5.4.1.2.1., obtém-se a seguinte expressão generalizada para o coeficiente de atrito de *Fanning* em regime turbulento rugoso:

$$\frac{1}{\sqrt{f_F}} = A \log \left(\frac{R}{k_r} \right) + B \quad (259)$$

Nikuradse estudou, numa instalação experimental, o escoamento turbulento de fluidos *Newtonianos* em condutas revestidas interiormente com grãos de areia com dimensão normalizada. Com base nos resultados obtidos, *Nikuradse* propôs a seguinte equação para a fórmula de resistência em regime turbulento rugoso:

$$\frac{1}{\sqrt{f_F}} = 4 \log \left(\frac{R}{k_r} \right) + 3,48 \quad (260)$$

A informação disponível para aplicação da expressão geral das perdas de carga em regime turbulento rugoso ao caso de fluidos não *Newtonianos* é muito reduzida.

No entanto, com base nos trabalhos de *Nikuradse*, *Torrance* generalizou a análise feita para os escoamentos turbulentos lisos aos escoamentos turbulentos rugosos, tendo obtido a seguinte equação para o coeficiente de *Fanning*:

$$\frac{1}{\sqrt{f_F}} = 4,07 \log \left(\frac{R}{k_r} \right) + 6,0 - \frac{2,65}{n} \quad (261)$$

Considera-se, no entanto, que esta equação, embora razoável, necessita de mais confirmação experimental.

Outro método vulgarmente utilizado na quantificação da perda de carga em regime turbulento rugoso, quando os fluidos são não-*Newtonianos*, consiste na multiplicação do valor obtido para o coeficiente de perda de carga (ou coeficiente de atrito de *Fanning*) utilizando as expressões indicadas para o caso do regime turbulento liso, por um coeficiente igual à razão entre os coeficientes de perda de carga em regime turbulento rugoso e liso de fluidos *Newtonianos*, admitindo a equivalência entre os respectivos números de *Reynolds*, isto é:

$$(\lambda_{nN})_{Rug.} = K_\lambda (\lambda_{nN})_{Liso} \quad (262)$$

em que:

$$K_\lambda = \frac{(\lambda_N)_{Rug.}}{(\lambda_N)_{Liso}} \quad (263)$$

5.4.2.2. Perfil de Velocidades

Quando o escoamento é turbulento rugoso o perfil de velocidades na subcamada viscosa é obtido a partir de uma equação do tipo:

$$f(v, y, \tau_p, \rho, k_r) = 0 \quad (264)$$

donde resulta, aplicando a análise dimensional, do mesmo modo que nos casos anteriores:

$$v^+ = f\left(\frac{y}{k_r}\right) \quad (265)$$

Esta expressão traduz a lei de parede correspondente a superfícies rugosas.

Considerando que esta equação é semelhante à obtida para o perfil de velocidades na camada limite turbulenta quando o regime é turbulento liso, conclui-se que, neste caso, o perfil de velocidades na subcamada viscosa poderá ser dado pela seguinte equação:

$$v^+ = A \log\left(\frac{y}{k_r}\right) + B \quad (266)$$

Nikuradse obteve, experimentalmente, os valores $A=5,75$ e $B=8,5$ para os coeficientes da equação (266).

Partindo dos valores propostos por *Nikuradse*, *Torrance* generalizou os resultados obtidos, admitindo que, quando o regime é turbulento rugoso, a relação entre o perfil de velocidades obtido para fluidos *Newtonianos* e não-*Newtonianos* é idêntica à verificada no caso de escoamentos turbulentos lisos. Nestas condições, propôs a seguinte equação generalizada para o perfil de velocidades na subcamada viscosa em regime turbulento rugoso:

$$v^+ = \frac{5,75}{n} \log\left(\frac{y}{k_r}\right) + 8,5 \quad (267)$$

A equação do perfil de velocidades na camada limite turbulenta é, em regime turbulento rugoso, idêntica à deduzida em, 5.4.1.3.2., para o regime turbulento liso, equação (255).

Por sua vez, na zona de transição, poderá admitir-se a aplicação da equação (254) substituindo o valor de y^+ por y/k_r .

Então, na zona de transição, o perfil de velocidades será dado, empiricamente, pela equação:

$$v^+ = 11,5 \log\left(\frac{y}{k_r}\right) - 3,05 \quad (268)$$

5.4.3. Regime de Transição Liso-Rugoso

Por definição, o regime turbulento de transição liso-rugoso ocorre quando a resistência ao escoamento é devida, em simultâneo, às características reológicas do fluido e à rugosidade da parede sólida que limita o escoamento.

Atendendo à natureza intermédia deste regime de escoamento, *Colebrooke e White* propuseram a seguinte expressão para o coeficiente de perda de carga, λ , de fluidos *Newtonianos*:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\left(\frac{k_r}{D} \right)}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (269)$$

Esta equação, cuja validade foi experimentalmente confirmada, representa uma combinação das expressões obtidas para o coeficiente de perda de carga em regime turbulento liso e rugoso.

Por este motivo, a fórmula de *Colebrooke–White* é uma expressão generalizada para o cálculo das perdas de carga quando os escoamentos são turbulentos porque reduz-se às expressões obtidas para os regimes liso e rugoso quando, respectivamente, a rugosidade da conduta é aproximadamente nula ou o número de *Reynolds* do escoamento é muito elevado.

Existem muitas outras metodologias alternativas para o cálculo das perdas de carga em regime turbulento de transição liso-rugoso que são, em geral, extensíveis a toda a gama de regimes turbulentos existentes.

Refere-se, assim, em primeiro lugar, o diagrama universal de *Moody* que, para vários valores da rugosidade relativa da conduta, k_r/D , apresenta, num diagrama logarítmico, a relação entre o número de *Reynolds*, Re , e o coeficiente de perda de carga, λ . Existem, ainda, na bibliografia muitas outras expressões equivalentes à fórmula de *Colebrooke–White* mas que permitem o cálculo explícito do coeficiente de perda de carga, nomeadamente, referem-se as expressões de *Moody*, *Barr* e *Malafaya–Baptista*.

Quando os fluidos têm um comportamento reológico não-*Newtoniano*, não existem na bibliografia expressões propostas para o coeficiente de perda de carga aplicáveis aos escoamentos em regime de transição liso-rugoso.

Propõe-se, assim, a generalização do método indicado em 5.4.2.1. para o regime turbulento rugoso, que consiste na determinação do coeficiente de perda de carga a partir da equação (262), mas onde a constante de proporcionalidade entre o regime turbulento liso-rugoso e o regime turbulento liso para fluidos *Newtonianos* é dada pela seguinte equação generalizada:

$$K_{\lambda} = \frac{(\lambda_N)_{Liso-Rug.}}{(\lambda_N)_{Liso}} \quad (270)$$

Apresenta-se, na **figura 49**, um ábaco onde, para vários valores da rugosidade relativa, é possível obter o valor da constante de proporcionalidade, K_{λ} , em função do número de *Reynolds* do escoamento.

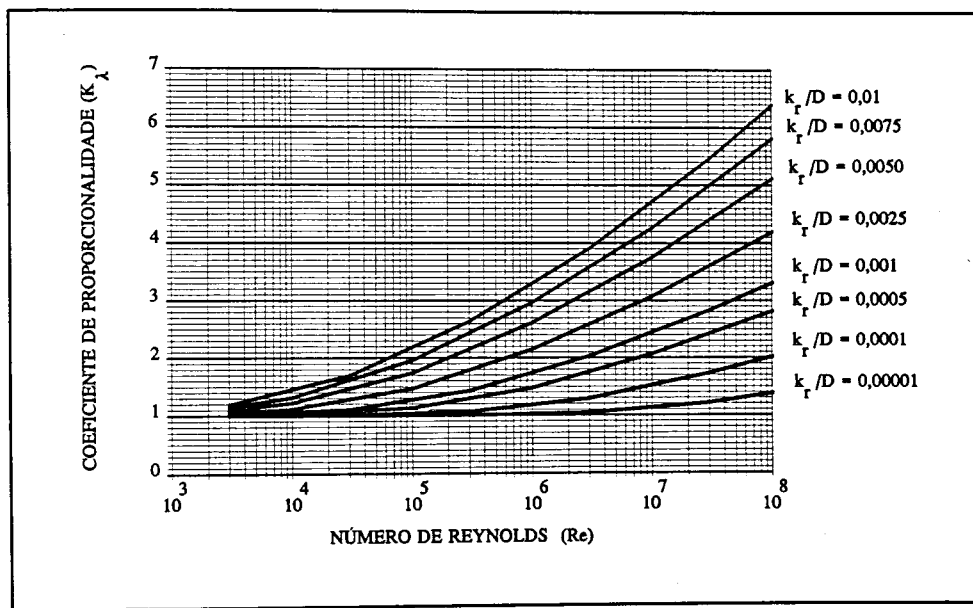


figura 49 – Ábaco para determinação da constante de proporcionalidade, K_{λ} , entre as perdas de carga em regime turbulentos não lisos e lisos.

5.5. ESTABELECIMENTO DO ESCOAMENTO

Independentemente do regime de escoamento existente, no trecho inicial de uma conduta existe, sempre, uma zona designada por zona de estabelecimento do escoamento, onde ocorre uma gradual adaptação do perfil de velocidades às características específicas do escoamento na conduta.

Considere-se, então, o esquema apresentado na **figura 50**. Imediatamente a jusante da secção de entrada na conduta a velocidade do escoamento é praticamente uniforme em toda a secção transversal do escoamento. Nestas condições, a espessura da camada limite é nula.

Considera-se o escoamento totalmente estabelecido a partir da secção onde o perfil de velocidades é simétrico e crescente desde a fronteira sólida até ao eixo da conduta e define-se, normalmente, o comprimento de estabelecimento, L_e , como a distância, em relação à secção de entrada, em que a velocidade no eixo da conduta atinge um valor igual a 99% do correspondente à velocidade do regime estabelecido.

A determinação do valor de L_e é dependente do regime de escoamento existente na conduta e, no caso de escoamentos laminares, das características reológicas do fluido.

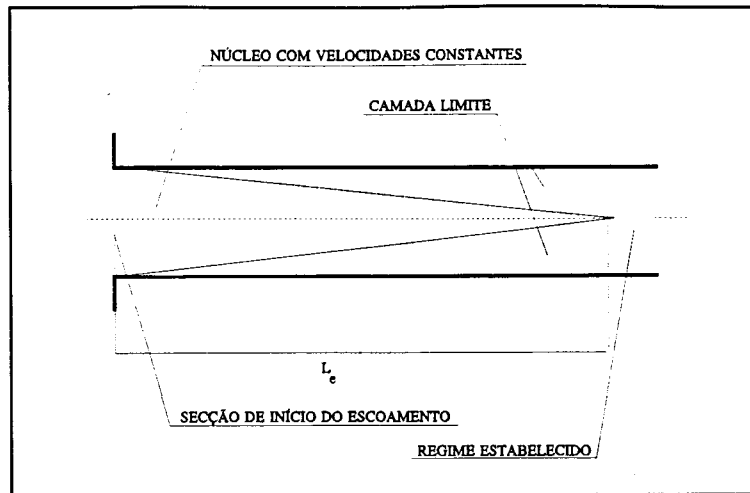


figura 50 – Estabelecimento do escoamento (adaptado de Novais-Barbosa [60]).

Assim, quando o escoamento é laminar e o fluido não tem tensão de cedência, os resultados experimentais obtidos por *Collins e Schowater* indicam a dependência do comprimento de estabelecimento em relação ao número de *Reynolds* dada pela seguinte relação:

$$\frac{L_e}{D} = 2K_e \frac{\rho D^n U^{(2-n)}}{K} \quad (271)$$

A constante de proporcionalidade K_e , é função do índice de potência, n , do fluido, tendo *Collins e Schowater* proposto o diagrama apresentado na *figura 51* para determinação do seu valor.

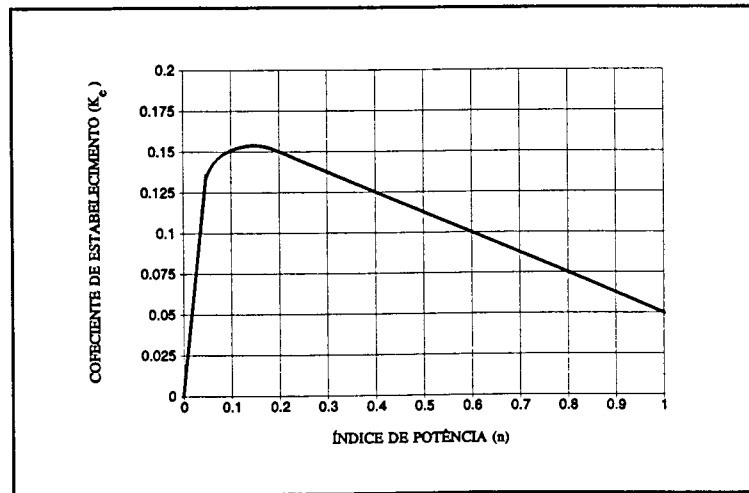


figura 51 – Diagrama de Collins-Schowater para determinação do coeficiente de estabelecimento, K_e , no escoamento laminar de fluidos sem tensão de cedência.

Quando os fluidos são do tipo plástico de *Bingham*, *Michiyoshi*, *Mizuno* e *Hoshiai* propuseram a seguinte equação para o comprimento de estabelecimento:

$$\frac{L_e}{D} = K_{e_B} \frac{\rho U D}{\eta_B} \quad (272)$$

Neste caso, a constante de proporcionalidade, (K_{e_B}) , é dependente do valor de τ_c / τ_p e poderá ser obtida a partir do diagrama apresentado na *figura 52*.

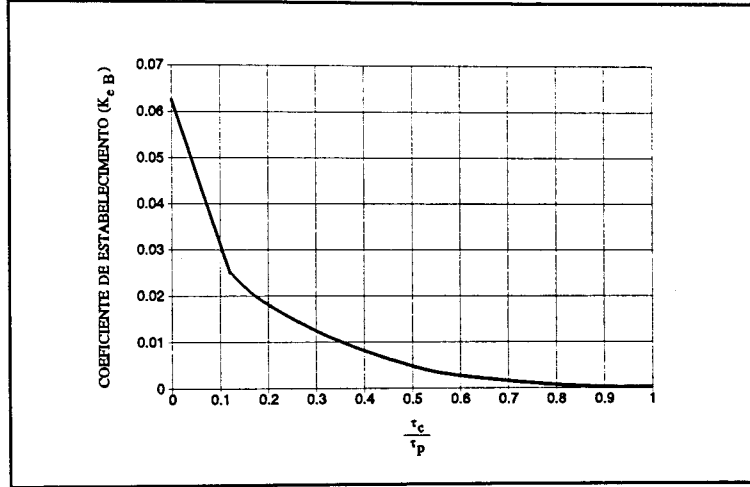


figura 52 – Diagrama de Michiyoshi–Mizuno–Hoshiai para determinação do coeficiente de estabelecimento no escoamento laminar de fluidos plásticos de Bingham.

Verifica-se, assim, que no caso de fluidos plásticos de *Bingham*, o comprimento de estabelecimento do escoamento é máximo quando a tensão de cedência é nula, isto é, fluidos *Newtonianos*.

Quando o regime do escoamento é turbulento considera-se, geralmente, que o escoamento está totalmente estabelecido a uma distância da secção de entrada, L_e , tal que:

$$\frac{L_e}{D} \geq 50 \quad (273)$$

Com base num reduzido número de resultados experimentais, *Dodge* e *Metzner* concluíram que, para fluidos não *Newtonianos* sem tensão de cedência, o comprimento de estabelecimento do escoamento poderia ser dado pela equação:

$$\frac{L_e}{D} \leq 15 \quad (274)$$

Atendendo, à grande discrepância verificada entre o comprimento de estabelecimento do escoamento para fluidos *Newtonianos* e os não-*Newtonianos* sem tensão de cedência propõe-se a adopção, em regime turbulento, do critério mais prudente, isto é o indicado na equação (273).

Conclui-se, assim, que o comprimento de estabelecimento do escoamento máximo é obtido para escoamentos em regime laminar quando este regime atinge a fase de transição para turbulento.

5.6. REDUÇÃO DO ARRASTO

Nos escoamentos de alguns fluidos constituídos por uma fase líquida a que se adicionou outra substância, designada genericamente por aditivo, pode acontecer que a dissipação de energia verificada no escoamento da mistura seja inferior à verificada no escoamento, apenas, da fase líquida sem o aditivo, isto é:

$$\frac{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{mistura}}{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{líquido}} < 1 \quad (275)$$

Considera-se que ocorre redução do arrasto quando se verifica uma redução no valor da dissipação de energia do escoamento relativamente ao valor estimado apenas para a fase líquida do fluido.

O fenómeno de redução do arrasto está, em geral, associado à existência de polímeros dissolvidos na fase líquida ou de sólidos fibrosos (com valores para $l/D > 10$).

A redução do arrasto pode traduzir-se, na prática, por um retardamento da transição do regime laminar para o turbulento, uma transição bastante extensa entre o regime laminar e o turbulento e, finalmente, por uma redução dos valores da perda de carga em regime turbulento.

Podem, então, definir-se três regiões distintas na análise da evolução das perdas de carga com o número de *Reynolds* de um fluido a que se adicionou um aditivo que lhe confere redução do arrasto.

Na primeira região, correspondente a baixos números de *Reynolds*, a presença do aditivo provoca um aumento da dissipação de energia traduzido por uma translação para a direita da recta que representa a relação entre o coeficiente de perda de carga e o número de *Reynolds*. Verifica-se, assim, que a presença do aditivo provoca uma modificação das propriedades reológicas do fluido que passa a apresentar uma determinada tensão de cedência.

A segunda região é uma região intermédia normalmente bastante extensa situada entre o regime laminar e o turbulento propriamente ditos. Nesta região detecta-se a ocorrência de redução do arrasto traduzida pelo retardamento da passagem ao regime turbulento devida à existência de macromoléculas e/ou fibras no fluido que amortecem as tensões tangenciais de natureza turbulenta prolongando a zona de influência das tensões de natureza viscosa até números de *Reynolds* bastante elevados e reduzindo, assim, o valor da dissipação de energia ocorrida em relação ao valor estimado a partir das expressões teóricas existentes.

A terceira região corresponde à zona turbulenta. Nesta região podem ocorrer dois comportamentos distintos no fluido. Assim, o efeito amortecedor das perdas de carga motivado pela existência das fibras e/ou macromoléculas, pode-se dissipar quando os números de *Reynolds* são muito elevados, convergindo a curva que traduz a relação entre o coeficiente de perda de carga e o número de *Reynolds* para a curva prevista pelas fórmulas existentes ou, em alternativa, o efeito mantém-se, convergindo essa relação para uma curva paralela

à prevista mas onde os valores do coeficiente de perda de carga, para um dado valor do número de *Reynolds*, são inferiores aos previstos, apenas, para o fluido.

Apresenta-se, na *figura 53*, uma previsão dos vários tipos possíveis de redução do arrasto em função do tipo de sólidos existentes no fluido.

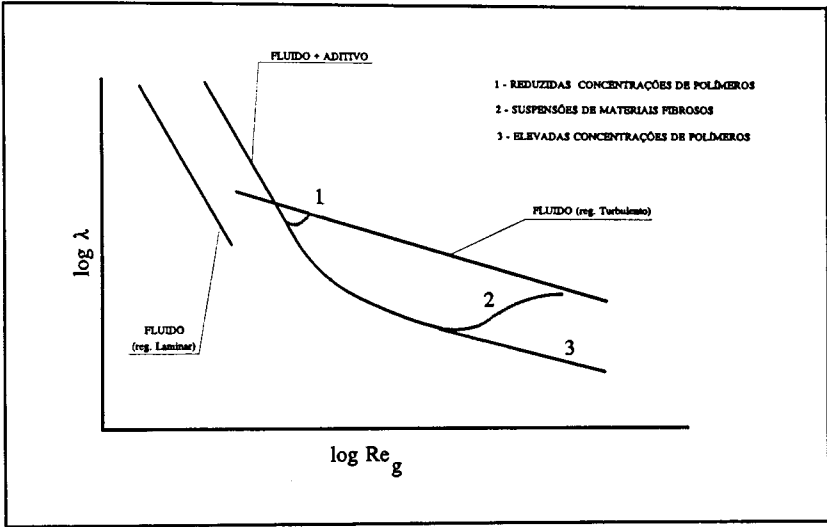


figura 53 – Previsão dos vários tipos possíveis de redução do arrasto em função do tipo de sólidos presente no fluido (adaptado de Radin et al [68]).

6. ESTUDOS EXPERIMENTAIS

O conhecimento das características hidrodinâmicas de um escoamento e, em particular, do hidrotransporte de sólidos, realiza-se, normalmente, com recurso a instalações experimentais onde, utilizando circuitos hidráulicos fechados, é possível estudar as características do escoamento numa ou em várias condutas e para vários regimes de escoamento.

Estas instalações permitem quantificar as perdas de carga existentes no escoamento do fluido, em especial quando o regime do escoamento é turbulento e quando os testes reológicos efectuados não são, por si sós, suficientes para permitir a quantificação do valor da dissipação de energia.

Contudo, mesmo quando o escoamento é laminar, a realização de ensaios hidrodinâmicos é útil pois permite detectar a ocorrência de alguns fenómenos no escoamento do fluido, nomeadamente, deslizamento junto às fronteiras sólidas ou redução do arrasto, por comparação entre os resultados obtidos nos ensaios reológicos e nos testes hidrodinâmicos.

Os estudos experimentais realizados no âmbito da presente Dissertação recorreram, então, às técnicas anteriormente referidas para acompanhar a influência do processo de digestão anaeróbia das lamas produzidas em estações de tratamento de águas residuais domésticas nas características hidrodinâmicas do seu escoamento em condutas sob pressão.

Numa primeira fase, o estudo limitou-se à análise das características hidrodinâmicas das lamas digeridas. Esta fase do estudo permitiu experimentar a instalação destinada à realização dos ensaios hidrodinâmicos efectuando algumas adaptações que se concluiu serem necessárias para o bom funcionamento da instalação e, conseqüentemente, para o rigor dos resultados obtidos.

Esta fase permitiu, também, constatar que a geometria disponível para realização dos estudos reológicos não era a mais adequada para efectuar os ensaios reológicos necessários, pois, tratando-se de cilindros concêntricos com um espaçamento entre os cilindros muito reduzido, ocorriam interferências nas leituras motivadas por aglomerações de partículas sólidas em contacto com ambas as superfícies. Optou-se, assim e nesta fase, pela aquisição de outra geometria mais adaptada à medição do comportamento reológico de fluidos com as características evidenciadas pelas lamas.

Embora esta primeira fase do estudo tenha permitido aprofundar o conhecimento do comportamento hidrodinâmico das lamas e, sobretudo, solucionar alguns problemas associados à medição da dissipação de energia com este tipo de fluidos, nomeadamente, os causados pela existência de biogás no escoamento e as interferências provocadas pelas bolhas gasosas nas medições efectuadas, pode-se afirmar que os objectivos principais da investigação efectuada só foram plenamente atingidos na segunda fase dos ensaios.

Na realidade, a segunda fase dos ensaios consistiu na ampliação da instalação experimental existente de modo a permitir simular em laboratório o processo de digestão anaeróbia aquecida das lamas. Desta maneira, permitiu-se o acompanhamento da evolução do comportamento reológico, hidrodinâmico e granulométrico das lamas ao longo de um processo de digestão desde um instante inicial que se procurou ser o mais próximo possível do instante em que as lamas foram retiradas dos espessadores gravíticos existentes

na estação de tratamento que as forneceu, e um instante final correspondente ao final do processo de digestão quando as lamas apresentam as características típicas de lamas digeridas.

A instalação utilizada na primeira fase das experiências utilizou o mesmo circuito fechado destinado aos ensaios hidrodinâmicos e o mesmo tanque de lamas, embora sem os dispositivos que permitem a realização do processo de digestão anaeróbia nas condições consideradas ideais.

Apresenta-se, na *figura 54*, um esquema da instalação experimental utilizada durante a segunda fase dos estudos experimentais e que serviu de base à simulação do processo de digestão anaeróbia aquecida com agitação das lamas e, simultaneamente, à realização dos estudos hidrodinâmicos.

Periodicamente, realizaram-se, ainda, testes às lamas existentes no reactor biológico anaeróbio destinados a determinar as suas características reológicas e granulométricas, bem como proceder à caracterização da respectiva fracção sólida em termos de sólidos totais e de sólidos voláteis.

Mediu-se, ainda, periodicamente, o valor do pH das lamas em digestão com o objectivo de proceder, quando necessário, à sua correcção e evitar, deste modo, o colapso do processo de digestão em curso.

Por último, a evolução do processo de digestão anaeróbia aquecida foi, também, acompanhado através da medição do biogás produzido no tanque e libertado para a atmosfera por uma conduta ligada a um medidor volumétrico de biogás.

Apresenta-se, em seguida, uma descrição pormenorizada da instalação experimental que serviu de base à realização das experiências, bem como, dos equipamentos utilizados e das técnicas e metodologias seguidas durante os estudos experimentais efectuados.

6.1. REACTOR BIOLÓGICO ANAERÓBIO

O reactor biológico anaeróbio foi construído com todas as características e equipamentos necessários para simular, à escala laboratorial, o processo de digestão anaeróbia aquecida com agitação existente nas estações de tratamento de águas residuais.

Apresenta-se, na *figura 55*, o reactor utilizado nos estudos experimentais.

O tanque utilizado na construção do reactor é em polietileno de baixa densidade com uma capacidade máxima de $0,76 \text{ m}^3$ e as dimensões de $1,4 \times 0,70 \times 0,78 \text{ m}^3$.

Para conseguir a necessária estanquicidade no interior do reservatório e impedir a ocorrência de fugas não controladas de biogás para o exterior, construiu-se uma tampa hermética em perspex equipada com uma vedação de borracha, colada ao reservatório e aparafusada com parafusos afastados de cerca de 5 cm.

O reactor dispõe de uma sistema agitação das lamas e de um sistema de aquecimento dimensionados para garantir a ocorrência das condições ideais de digestão anaeróbia.

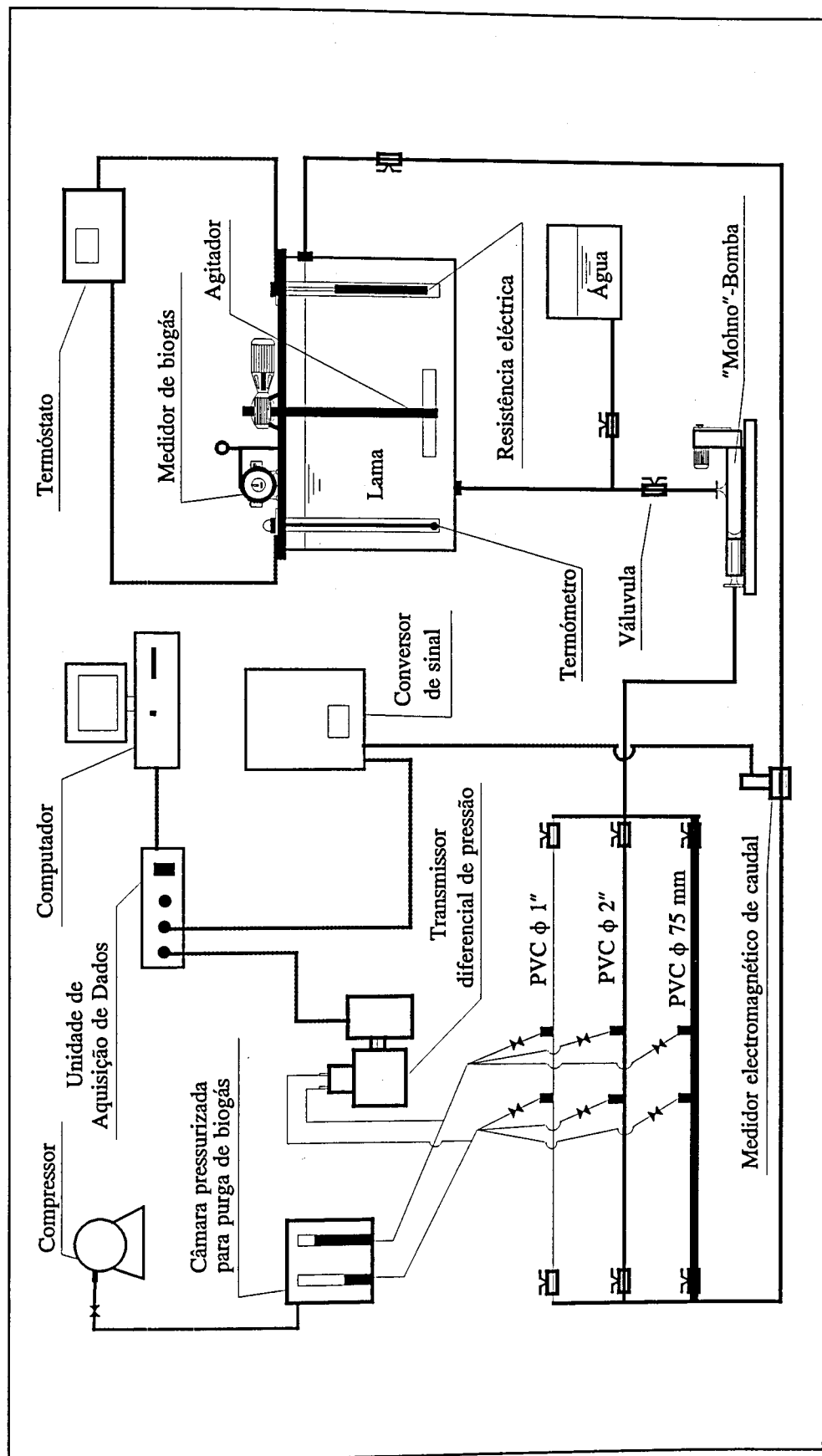


figura 54 – Representação esquemática da instalação experimental.

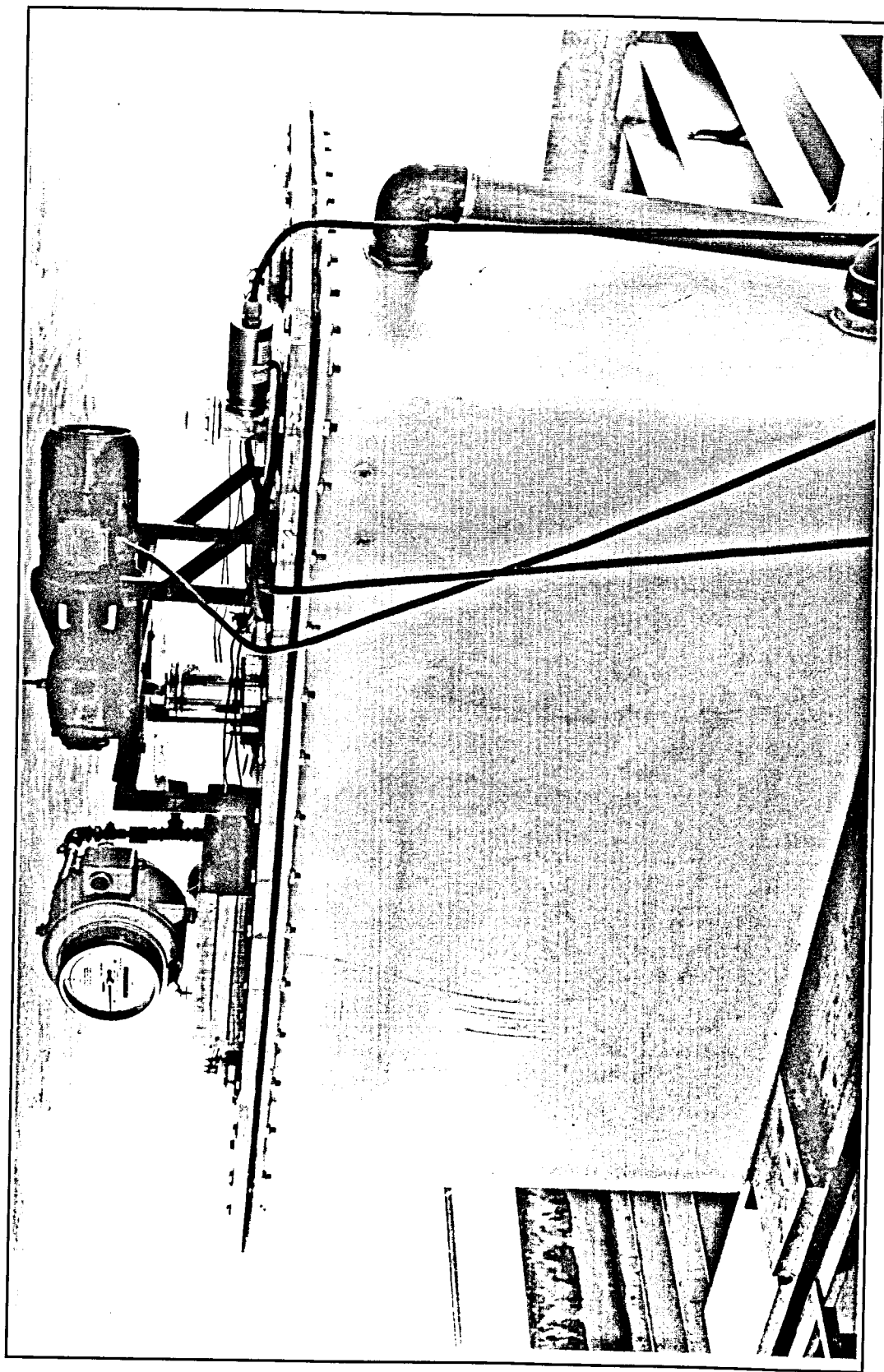


figura 55 –Reactor biológico anaeróbio de lamas.

6.1.1. Sistema de Agitação das Lamas

O sistema de agitação das lammas no interior do tanque é constituído por três componentes principais:

- um agitador;
- um moto-reductor;
- um dispositivo anti-fugas de biogás.

O agitador utilizado tem o veio em aço inoxidável e as pás em aço macio ST 37 pintadas com pintura anti-corrosiva. O agitador foi dimensionado para permitir a necessária homogeneização das lammas no interior do tanque sem, no entanto, transmitir uma potência de agitação demasiadamente elevada que, para além de desnecessária, poderia alterar as condições normais de funcionamento deste órgão.

Dimensionou-se, assim, um sistema de mistura lenta composto por um agitador do tipo pá movido por um moto-reductor da marca **Fellino**, equipado com um motor de **0,37 kW** e dando à saída uma velocidade de rotação de **125 rpm**.

Embora o sistema de agitação tenha sido construído na oficina do *Laboratório de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente*, seguiram-se as especificações existentes para os agitadores de mistura lenta da marca **Dosapro**, modelo **VRE 2020**, próprios para agitação de suspensões de lammas com concentrações em sólidos inferiores a **8%**.

Com o objectivo de garantir a estanquicidade do reservatório, projectou-se um dispositivo especial destinado a impedir a fuga do biogás para o exterior, através do orifício efectuado na tampa do reservatório para permitir a passagem do veio do agitador.

Este dispositivo consiste numa peça metálica, dotada de uma câmara no centro, por onde passa o veio do agitador, vedada nas duas extremidades com um vedante especial em borracha e cheia com um óleo lubrificante de modo a garantir a necessária estanquicidade.

A ligação estanque ao tampo em perspex foi conseguida com uma vedação em borracha colada ao tampo e aparafusada com quatro parafusos. A inexistência de qualquer tipo de fugas gasosas por este dispositivo foi devidamente testada durante a fase preparatória em que a estanquicidade do tanque foi objecto de ensaios específicos.

Apresenta-se, na *figura 56*, o esquema do agitador e do dispositivo destinado a impedir fugas de biogás.

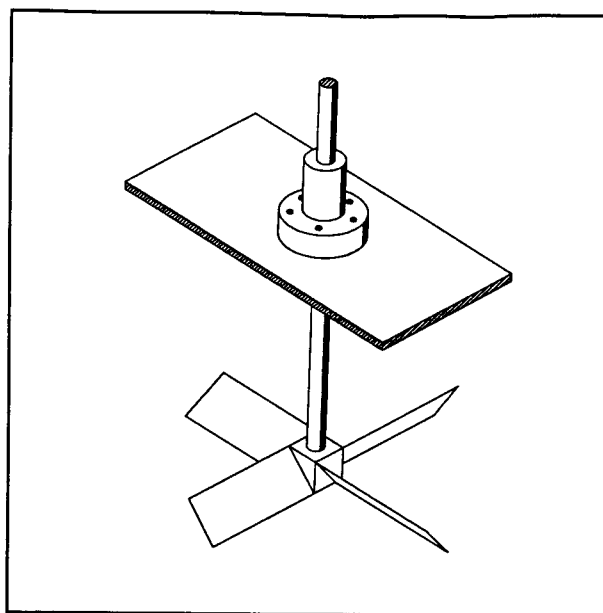


figura 56 – Agitador de mistura lenta das lammas e dispositivo anti-fugas de biogás.

6.1.2. Sistema de Aquecimento das Lamas

O sistema de aquecimento e controlo da temperatura das lammas no interior do digestor anaeróbio é constituído pelos seguintes elementos:

- resistências eléctricas do tipo cerâmico colocadas no interior de bainhas estanques em aço inoxidável;
- um termómetro colocado no interior de uma bainha estanque em aço inoxidável;
- um termóstato programável.

O aquecimento das lammas no interior do digestor foi realizado a partir de quatro resistências eléctricas do tipo cerâmico introduzidas no interior de bainhas em aço inoxidável constituídas por um tubo com a extremidade inferior fechada, por soldadura de um tampão em aço inoxidável com as dimensões do tubo, e com a extremidade superior aberta e dotada de uma flange metálica, também soldada ao tubo, que permitiu o seu aparafusamento à superfície exterior do tampo em perspex. A estanquicidade da ligação foi garantida através da aplicação de vedantes em borracha colados tanto à flange como ao tampo.

Apresenta-se, na *figura 57*, as peças constituintes deste dispositivo.

As resistências eléctricas foram adaptadas às condições de funcionamento previstas no interior do tanque, tendo-se efectuado o aquecimento apenas na parte inferior do dispositivo de modo a garantir o aquecimento apenas abaixo do nível da superfície livre e, assim, evitar a provável destruição do tampo em perspex por condução do calor ao longo das bainhas metálicas na zona superior do reactor ocupada pelo biogás.

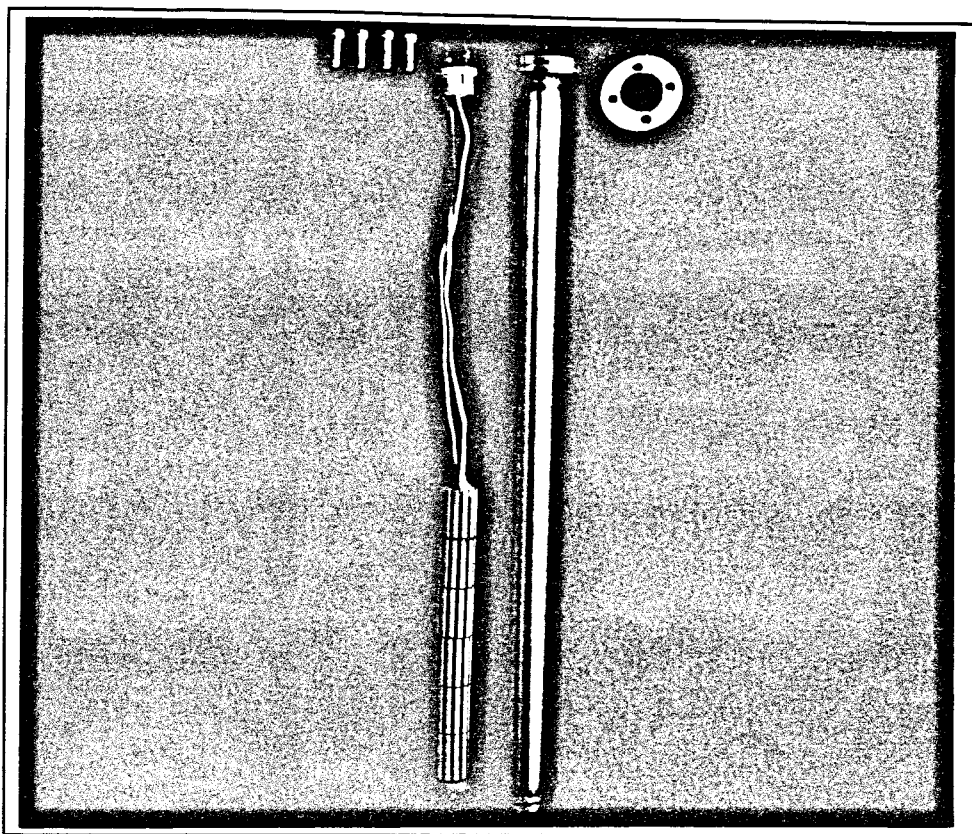


figura 57 – Dispositivo utilizado para aquecimento das lamas no digestor.

O dispositivo utilizado para inserção do termómetro no digestor é em tudo idêntico ao descrito anteriormente para as resistências eléctricas.

O sensor de temperatura posiciona-se na extremidade inferior da baíña estando encostado à tubagem. Atendendo à natureza metálica do material da tubagem e à profundidade a que a medição é efectuada, admitiu-se que a transmissão do calor das lamas ao termómetro, por condução através da superfície metálica, seria suficientemente exacta.

No entanto, após a entrada da instalação em funcionamento, aferiu-se o rigor da medição realizada em amostras de lamas colhidas no início do circuito fechado destinado aos ensaios hidrodinâmicos.

O controlo da temperatura das lamas no interior do digestor foi realizado com recurso a um termóstato programável que recebe em contínuo informação emitida pelo termómetro através de um termopar. Por comparação entre os valores programados relativos à temperatura média desejada e à flutuação admissível e os valores recebidos, são automaticamente accionadas, ou não, as resistências eléctricas para proceder ao aquecimento das lamas.

Durante as experiências a temperatura média das lamas foi sempre mantida nos 33°C e a flutuação máxima admissível foi fixada em $\pm 2^\circ\text{C}$.

Apresenta-se na, *figura 58*, o diagrama global utilizado para proceder ao aquecimento e controlo do aquecimento das lamas no interior do digestor.

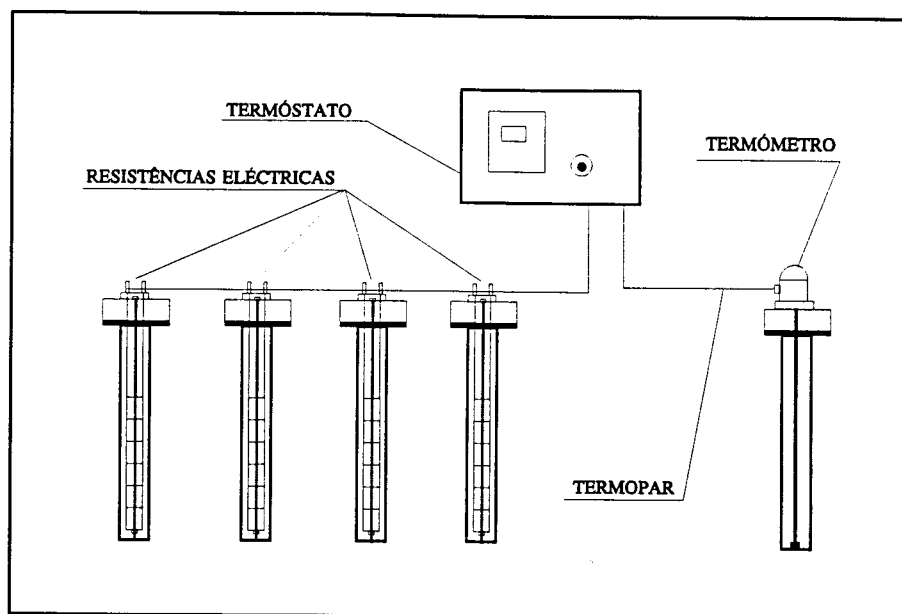


figura 58 - Esquema utilizado para aquecimento e controlo do aquecimento das lamas.

6.2. ACOMPANHAMENTO E CONTROLO DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA

O acompanhamento e controlo do processo de digestão anaeróbia realizou-se utilizando as seguintes técnicas:

- medição do biogás produzido;
- medição dos sólidos totais e voláteis;
- medição do pH e, quando necessário, determinação da dosagem de leite de cal necessária para proceder à respectiva correcção.

6.2.1. Medição do Biogás

A quantificação do biogás produzido no processo de digestão anaeróbia foi efectuado utilizando um medidor volumétrico de biogás da marca **Schlumberger** capaz de medir caudais de gás entre 1 e 500 dm³/h com uma pressão máxima de serviço de 100 mbar.

Para conhecer e controlar a pressão do biogás no interior do digestor instalou-se na conduta de alimentação do biogás ao medidor um manómetro da marca **Wika** e uma válvula de seccionamento com características apropriadas para funcionar com gás.

Apresenta-se, na *figura 59*, a instalação de recolha e medição do biogás produzido.

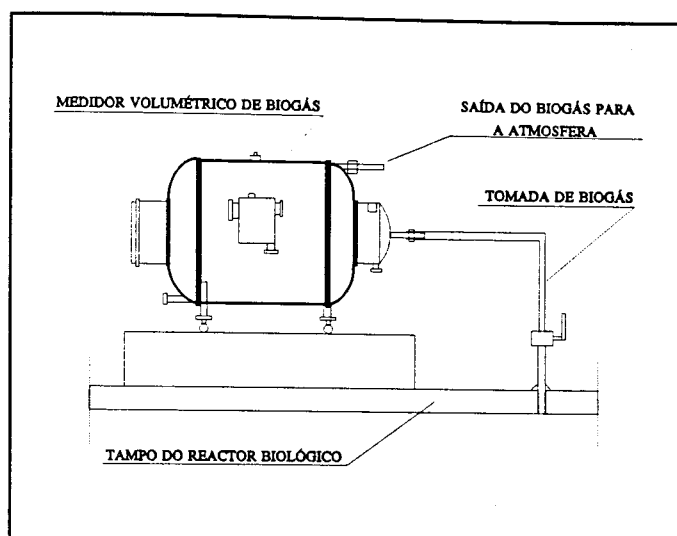


figura 59 – Instalação de recolha e medição do biogás produzido no reactor.

O medidor volumétrico de biogás utiliza a técnica de medição de gases baseada na rotação de um dispositivo mecânico rotativo contituído por palhetas no interior de um meio líquido (utilizou-se óleo mineral). Por acção do diferencial de pressão motivado pela ascensão e acumulação do biogás libertado na superfície inferior dessas palhetas ocorre uma rotação do dispositivo que pode ser relacionada com o caudal de gás libertado.

A calibração do medidor foi realizada na gama dos 50 a 500 dm^3/h tendo-se obtido um erro máximo de $-0,5\%$ entre o valor medido e o valor real.

Apresenta-se, na *figura 60*, a curva de calibração do medidor volumétrico de biogás utilizado.

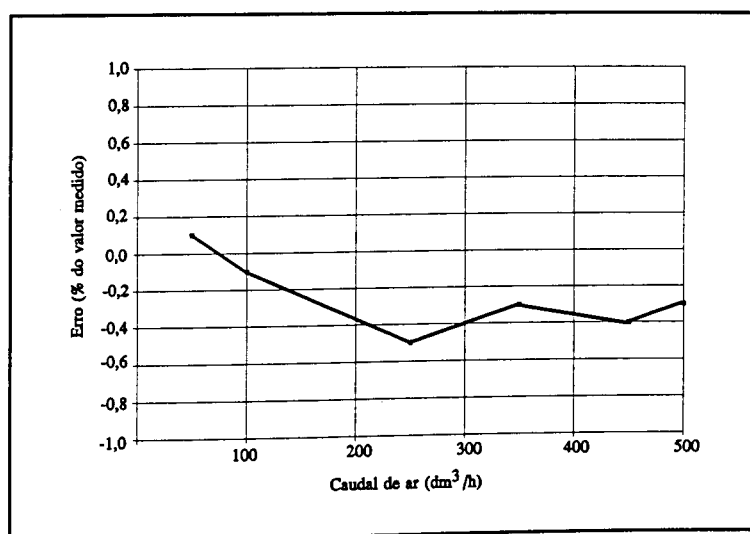


figura 60 – Curva de calibração do medidor volumétrico de biogás.

Antes da sua entrada em funcionamento, o reactor biológico anaeróbio descrito foi testado em laboratório para verificar se garantia as condições de estanquicidade exigidas.

Com esse objectivo, injectou-se no reservatório vazio ar comprimido até atingir uma pressão interior de 0,3 bar. Após 24 horas a leitura no manómetro registou uma redução da pressão no reservatório para um valor de 0,2 bar tendo-se, por isso, concluído que as condições de estanquicidade do reactor eram suficientes para se proceder à simulação do processo de digestão anaeróbia aquecida.

6.2.2. Medição dos Sólidos Totais e Voláteis

A medição dos sólidos totais e dos sólidos voláteis foi realizada periodicamente no *Laboratório de Engenharia Sanitária* da FEUP, utilizando amostras recolhidas no circuito fechado destinado aos ensaios hidrodinâmicos.

As amostras foram analisadas seguindo a metodologia indicada no "*Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*", 17th Edition [1].

Durante as experiências realizadas, a periodicidade média das determinações de sólidos totais e voláteis foi, no máximo, semanal e permitiu, fundamentalmente, acompanhar a redução em sólidos voláteis e, consequentemente, em sólidos totais, ocorrida durante o processo de digestão anaeróbia das lamas.

Na determinação dos sólidos totais realizaram-se cinco amostras de 30 ml cada que foram desidratadas a uma temperatura de 103°C por um período de 24 horas numa estufa da marca Heraeus. Esta estufa permite realizar desidratação ou aquecimento com elevada precisão até uma temperatura máxima de 250°C, com um controlo de temperatura de $\pm 1^\circ\text{C}$.

Após desidratação as amostras foram pesadas numa balança de precisão da marca Mettler E2000. Esta balança de precisão permite pesagens até 2 000 g com uma precisão máxima de 0,003 g.

A massa dos sólidos totais existente nas amostras obteve-se por diferença entre as pesagens efectuadas aos recipientes antes e após a introdução das lamas.

Após a determinação dos sólidos totais efectuou-se, nas mesmas amostras, a determinação das componentes orgânica e inorgânica do material sólido existente.

Para isso, volatilizou-se a componente orgânica das amostras a 550°C, durante 30 minutos no interior de uma mufla da marca Sybron Thermolyne 1500. Esta mufla permite atingir a temperatura máxima de 1200°C com uma precisão de $\pm 5\%$.

A pesagem posterior das amostras permitiu obter a massa dos sólidos inorgânicos e, por diferença com os sólidos totais, também a dos sólidos orgânicos presentes na amostra.

6.2.3. Medição e Controlo do pH

Nas amostras recolhidas mediu-se, também, o pH. Com efeito, este parâmetro é fundamental para o desenvolvimento do processo de digestão anaeróbia de lamas pois, como foi referido no **Capítulo 3**, a acção das bactérias metanogénicas é substancialmente reduzida para valores do pH inferiores a 6,0.

Importa referir que a digestão anaeróbia efectuada num digestor em funcionamento normal numa ETAR apresenta algumas diferenças em relação à digestão anaeróbia realizada no reactor utilizado nos estudos experimentais pois, neste caso, efectua-se, apenas, uma alimentação instantânea de lamas primárias espessadas a que se segue um processo de digestão prolongado no reactor fechado.

Se o processo tivesse lugar num digestor em funcionamento numa ETAR, seria retirada diariamente uma determinada quantidade de lamas digeridas e fornecida uma quantidade equivalente de lamas primárias espessadas.

Por este motivo, o tipo de digestão que ocorre na instalação experimental é mais parecido com o verificado numa ETAR durante a fase de arranque e existe, por isso, também neste caso, necessidade de proceder a algumas intervenções normalmente aconselhadas naquelas situações.

As intervenções realizadas restringiram-se à medição e controlo do pH das lamas, pois o desenvolvimento mais rápido, na fase inicial do processo, de bactérias acidogénicas e a consequente formação de ácidos voláteis, tem como resultado o abaixamento do pH das lamas que, quando atinge valores inferiores a 6,0, pode inibir o desenvolvimento das bactérias metanogénicas e, mesmo, suspender o processo de digestão anaeróbia em curso.

Para impedir esta situação realizaram-se periodicamente testes para medir o valor do pH nas lamas e, quando necessário, procedeu-se à determinação da dosagem de leite de cal necessária para conseguir manter o valor do pH na gama considerada óptima para o processo de digestão, isto é, entre 6,0 e 8,0. Este procedimento é idêntico ao seguido durante a fase de arranque de um digestor anaeróbio numa ETAR.

A determinação do pH e da dosagem de leite de cal necessária foi realizada utilizando um medidor de pH da marca **Metrohm Herisau E520**. Este medidor efectua medições de pH na gama de 0 a 14 com uma precisão de $\pm 0,01\%$.

A adição do leite de cal na amostra realizou-se a um ritmo muito lento, de modo a garantir a estabilização completa do valor do pH no equipamento de medida, e foi realizada com auxílio de um agitador magnético da marca **Sargent-Welch** com capacidade para atingir velocidades de agitação até 700 rpm.

Com efeito, durante as experiências, verificou-se que o processo de dissolução do leite de cal no interior da lama demora algum tempo e necessita de bastante agitação.

Para evitar a abertura do reactor biológico, a adição de leite de cal foi realizada a partir do pequeno reservatório existente no início do circuito hidráulico fechado, conseguindo-se a sua mistura rápida e eficaz

com a lama logo na passagem pela "mohno-bomba" e, depois, ao longo do circuito hidráulico até regressar ao reactor.

As dosagens de leite de cal foram cuidadosamente preparadas e programadas para minimizar os riscos de interferência com os valores medidos, nomeadamente, nos ensaios hidrodinâmicos e reológicos.

Assim, a dosagem máxima de cal nunca ultrapassou, durante uma determinada experiência, os **750 mg/l** o que significa que a percentagem de partículas de CaCO_3 introduzidas no sistema assumiu valores inferiores a **2,5%** dos sólidos existentes nas lamas para além de que os volumes de leite de cal adicionados terem sido sempre, também, inferiores a **1%** do volume total de lamas existentes no reactor.

6.3. CIRCUITO FECHADO DESTINADO AOS ESTUDOS HIDRODINÂMICOS

Os estudos hidrodinâmicos realizaram-se num circuito fechado ligado ao reactor biológico dimensionado para conseguir obter várias condições de escoamento que, no caso das lamas estudadas, permitiram obter regimes de escoamento laminar, turbulento e de transição.

Apresenta-se, na *figura 61*, o esquema e dimensões do circuito hidráulico fechado utilizado para realização dos ensaios hidrodinâmicos.

O circuito fechado onde se realizaram os estudos hidrodinâmicos é constituído por:

- um grupo electro-bomba do tipo "mohno", com variador de velocidade;
- uma zona de experiências constituída por um sistema de três condutas em PVC em paralelo;
- tomadas de pressão;
- um sistema de purga e limpeza da tubagem de ligação das tomadas de pressão ao transdutor diferencial de pressão;

6.3.1. Grupo Electro-Bomba

O grupo electro-bomba utilizado é do tipo "mohno", também conhecido pela designação de parafuso excêntrico.

O princípio de operação deste tipo de electro-bomba, consiste na rotação de um rotor com a forma de um parafuso excêntrico, em aço inoxidável, no interior de um estator em borracha sintética com uma configuração interior, do tipo parafuso excêntrico invertido.

A rotação do rotor no interior do estator com um ligeiro desfasamento entre as respectivas hélices provoca o avanço progressivo do fluido no interior do estator de acordo com a esquema apresentado na *figura 62*.

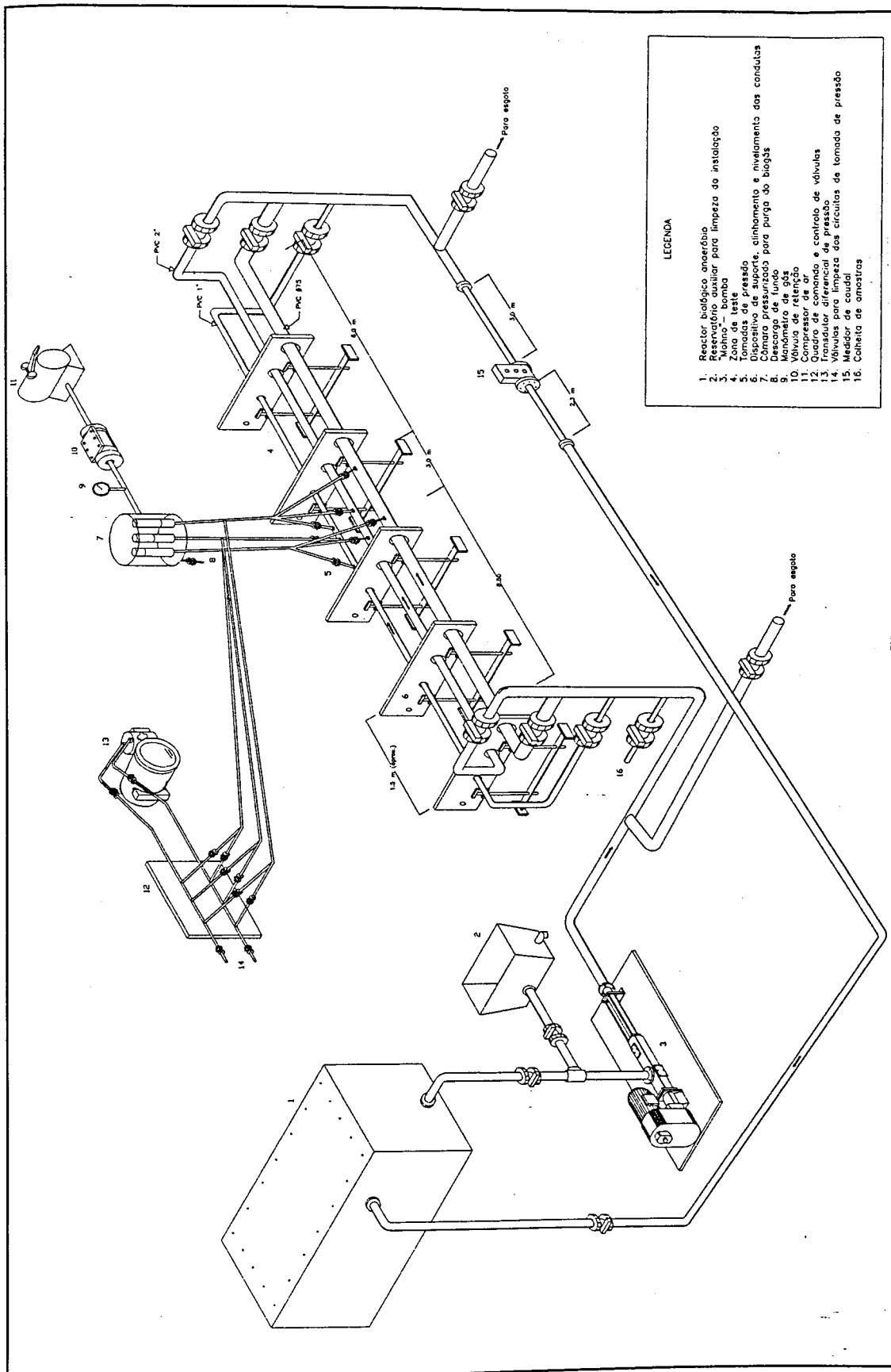


figura 61 – Esquema e dimensões do circuito hidráulico fechado onde se realizaram os estudos hidrodinâmicos.

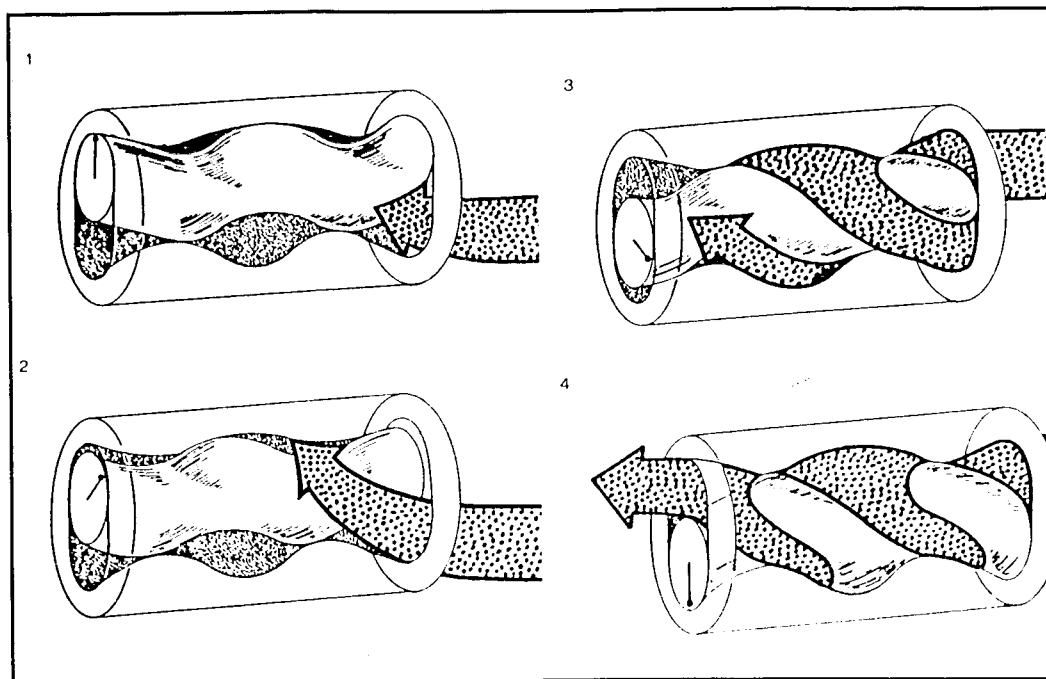


figura 62 – Princípio de operação de uma "mohno"-bomba.

As principais vantagens associadas a utilização deste tipo de electro-bomba são, para além da facilidade com que elevam materiais sólidos mesmo em concentrações muito elevadas, a ausência de pulsação no escoamento e a facilidade de funcionamento mesmo quando existem bolhas gasosas no interior do fluido.

Todos estes aspectos eram de primordial importância na instalação construída e, em particular, a ausência de pulsações na electro-bomba permitiu evitar a necessidade de inserir um amortecedor de pulsações a jusante do grupo pois não foram detectadas interferências deste tipo nas tomadas de pressão situadas mais a jusante na tubagem, para as diversas situações estudadas.

Apresenta-se, na *figura 63*, a "mohno"-bomba da marca Netsch, modelo NE 30 A utilizada na instalação experimental.

A "mohno"-bomba utilizada está dotada de um variador de velocidade que permite variar a velocidade de rotação do parafuso excêntrico entre 180 e 500 rpm o que corresponde a uma variação no caudal bombado entre 20 e 50 l/min. A potência da bomba é de 0,65 kW e a pressão máxima à saída de 6 bar.

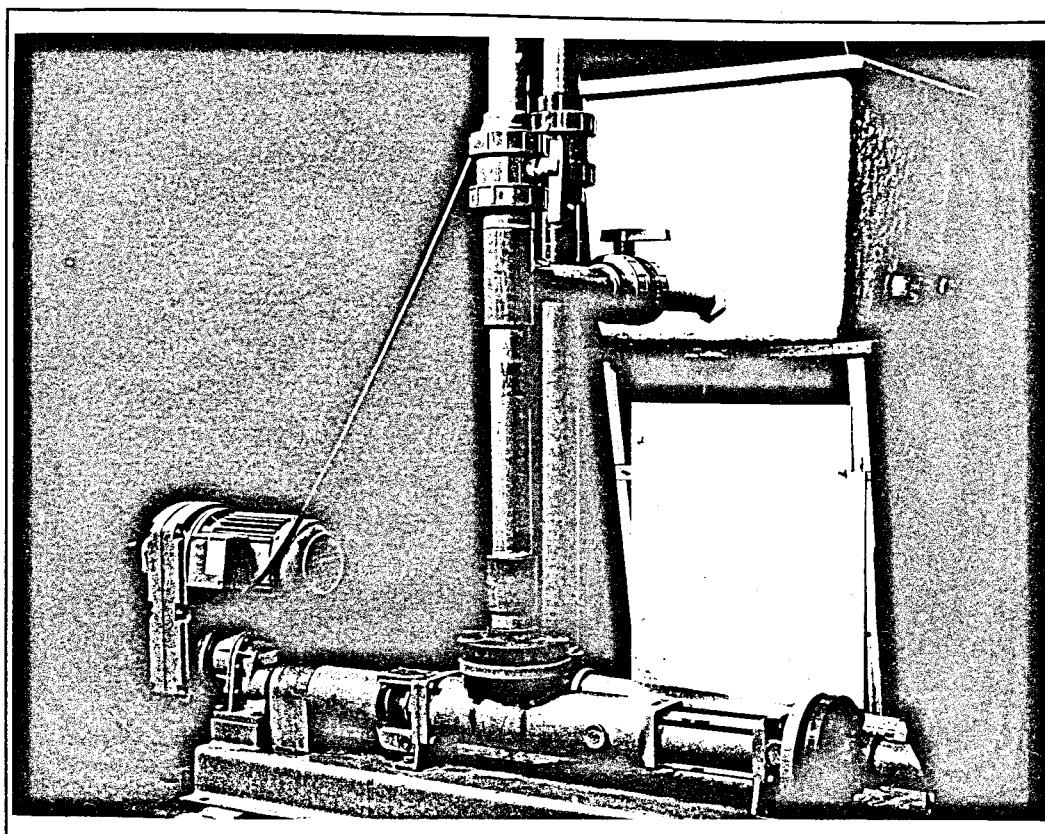


figura 63 – "Mohno"–bomba utilizada.

6.3.2. Zona de Experiências

A zona de experiências da instalação é constituída por três condutas em PVC com diâmetros comerciais de 1", 2" e 75 mm e com resistência a pressões até 10 kgf/cm². O diâmetro interior destas tubagens foi rigorosamente medido em laboratório tendo-se verificado que os diâmetros exactos são de, respectivamente, 23,0 mm, 46,5 mm e 62,5 mm.

Apresenta-se, na *figura 64*, a zona de experiências da instalação onde se realizaram os estudos hidrodinâmicos.

Como se pode verificar na *figura 61* a zona de experiências está limitada a montante e a jusante por um sistema de válvulas de seccionamento que permitem proceder às manobras de abertura e fecho necessárias para garantir que as medições se realizem sem qualquer tipo de interferência entre as diferentes condutas e, também, uma fácil e rápida mudança do escoamento para outra conduta.

Na zona destinada às experiências hidrodinâmicas a tubagem é mantida perfeitamente rectilínea e horizontal com auxílio de treze estruturas de suporte em alumínio apoiadas por meio de varões roscados a um sistema de fixação constituído por dois tubos de ferro galvanizado de secção quadrada.

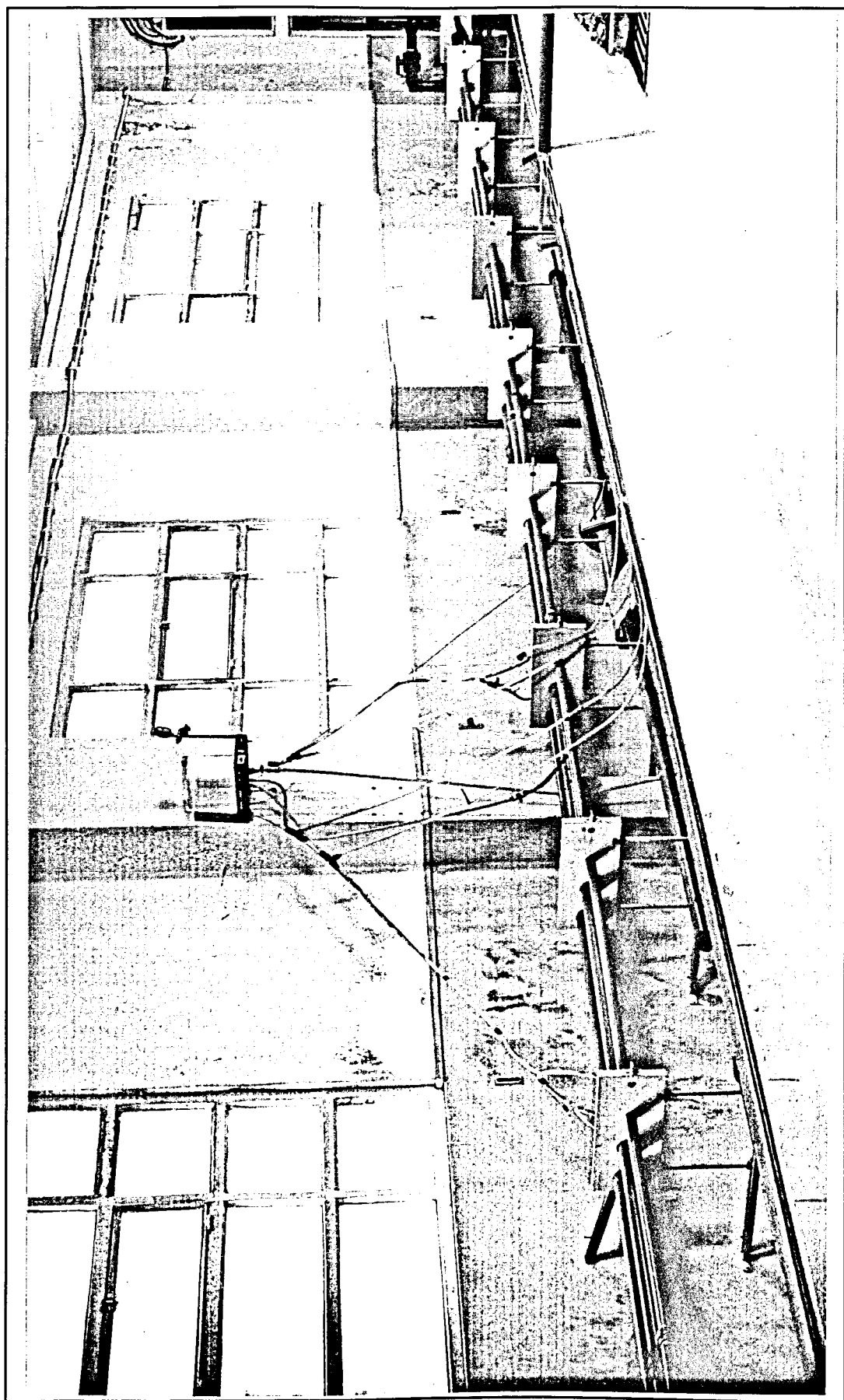


figura 64 – Zona de experiências da instalação onde se realizaram os ensaios hidrodinâmicos.

Apresenta-se, na *figura 65*, a estrutura de suporte utilizada e as respectivas dimensões.

A colocação das estruturas de suporte com um afastamento máximo de 1,5 m impede a flexão da tubagem, garantindo que ao longo da zona destinada às medições esta se mantenha perfeitamente rectilínea.

Por sua vez o alinhamento da tubagem pode ser conseguido por meio de movimentação na horizontal dos suportes, pois a inserção dos varões roscados no espaço entre os dois tubos quadrados permite a sua movimentação na horizontal enquanto não se efectua o aperto das porcas de fixação. Por último, o nivelamento das condutas foi conseguido por movimentação vertical dos varões roscados utilizando o sistema de porca e contra-porca.

O processo de nivelamento e alinhamento das condutas foi acompanhado com um teodolito electrónico da marca Zeiss que permitiu aferir a exactidão do posicionamento final da instalação.

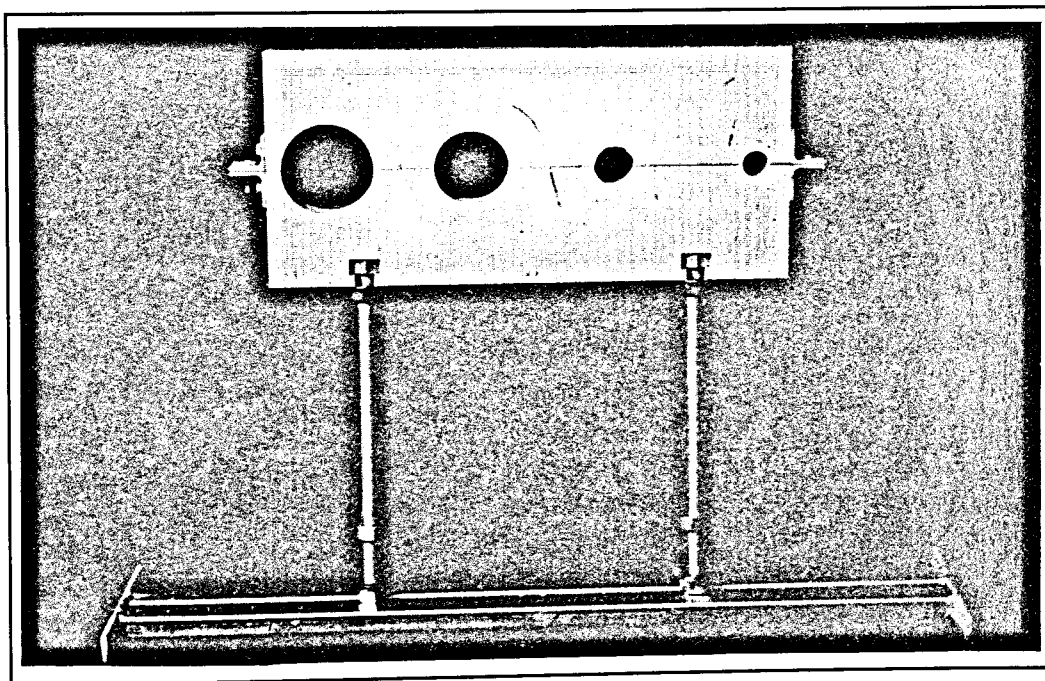


figura 65 – Estrutura de suporte para as condutas.

6.3.3. Tomadas de Pressão

A medição da pressão diferencial entre duas secções do escoamento localizadas na zona de experiências, exigiu a realização de tomadas de pressão.

A escolha das secções mais apropriadas para realização das tomadas de pressão teve em consideração a selecção de um trecho suficientemente afastado das extremidades de montante e de jusante de modo a garantir boas condições de estabilização do escoamento e, também, uma distância adequada, entre as duas tomadas de pressão, para garantir a medição da diferença de pressão ao longo de toda a gama de caudais bombados e de características reológicas previsíveis desde o início até ao fim de uma série de experiências.

Então, de modo a garantir a inexistência de qualquer tipo de interferências motivadas pelas singularidades existentes no início da zona de experiências, nomeadamente, as válvulas e as curvas (joelhos), admitiu-se que a distância mínima a que a primeira tomada de pressão deveria ser colocada, relativamente ao início da zona de experiências, deveria ser idêntica ao comprimento de estabelecimento do escoamento numa conduta, referido em 5.5..

Atendendo ao comprimento máximo total disponibilizado na zona de experiências (de 17,5 m), facilmente se constatou a impossibilidade prática de respeitar o comprimento de estabelecimento do escoamento proposto por *Collins e Schowalter* que, no caso de fluidos *Newtonianos*, atinge um valor máximo de $L/D=210$, quando se atinge a transição de regime laminar para turbulento.

Optou-se, então, por procurar respeitar os comprimentos de estabelecimento do escoamento propostos por *Michiyoshi, Mizuno e Hoshiai* que, no caso de fluidos *Newtonianos*, atingem um valor máximo de $L/D=126$ quando a tensão de cedência é nula.

Note-se, ainda, que estes valores são muito parecidos com os propostos por *White* [88] para fluidos *Newtonianos* o que constitui uma garantia adicional sobre a sua fiabilidade.

Substituindo nas equações referidas o valor do diâmetro interior da conduta de maior diâmetro, verifica-se que, na situação crítica de regime de transição, o comprimento máximo necessário para o estabelecimento do escoamento é de 8,5 m. Este comprimento já era realizável no espaço disponível para execução da instalação experimental e, foi, por isso, o valor escolhido para distância da primeira tomada de pressão ao início da zona de experiências.

Importa referir que, não se conhecendo, nesta fase, o comportamento reológico das lamas, não foi possível determinar o valor do número de *Reynolds* crítico correspondente a este fluido considerando as suas características não-*Newtonianas*.

Deve-se, no entanto, referir que a distância seleccionada para posicionamento da primeira tomada de pressão corresponde à situação mais desfavorável, isto é, à conduta de maior diâmetro. Para as outras condutas o valor de L/D é de 179 e 348, para os diâmetros de, respectivamente, 46,5 mm e 23,0 mm, bastante superiores, por isso, ao valor mínimo exigido.

Além disso, importa referir que as condições existentes no escoamento são mais favoráveis do que as consideradas na fixação das equações anteriormente referidas. Com efeito, neste caso não se trata da distância em relação à secção em que se inicia o escoamento mas, apenas, da distância à última singularidade existente antes do trecho rectilíneo e nivelado onde se realizam as medições.

Existe pouca informação disponível sobre a distância mínima necessária a jusante da última tomada de pressão, de modo a garantir que a primeira singularidade existente no final da zona de experiências não interfira com os valores medidos. Sabe-se, no entanto, que esta distância é consideravelmente inferior à referida anteriormente para o estabelecimento do escoamento.

Neste caso, optou-se por executar a instalação experimental de modo a garantir um valor mínimo de $L/D=90$ a jusante da última tomada de pressão o que, para a conduta de maior diâmetro, conduz a uma distância entre a última tomada de pressão e o final da zona de experiências de 6,1 m.

Obteve-se, assim, um trecho intermédio, considerado livre de qualquer perturbação, com 3 m de comprimento, que foi integralmente aproveitado para realização da medição da dissipação de energia nas condutas.

Efectivamente, verificou-se que, para a gama de caudais existente e para a gama de medição do transdutor diferencial de pressão, a distância mais adequada para proceder às medições era a máxima disponível, isto é, de 3,0 m.

No entanto, nos ensaios com lamas, verificou-se que, quando se utilizava a conduta de 1", os valores da dissipação de energia medidos conduziam a pressões diferenciais bastante elevadas e difíceis de medir na instalação existente. Optou-se, assim, por executar uma tomada de pressão nessa conduta distanciada, apenas, de 1 m em relação à tomada posicionada mais a montante tendo-se, neste caso, medido as pressões diferenciais entre estas duas tomadas de pressão.

A tomada de pressão propriamente dita, consiste num orifício perpendicular à parede da conduta com os bordos e a superfície livres de quaisquer rebarbas.

Segundo Tropea [82] as dimensões mais aconselháveis para as tomadas de pressão são as indicadas na figura 66.

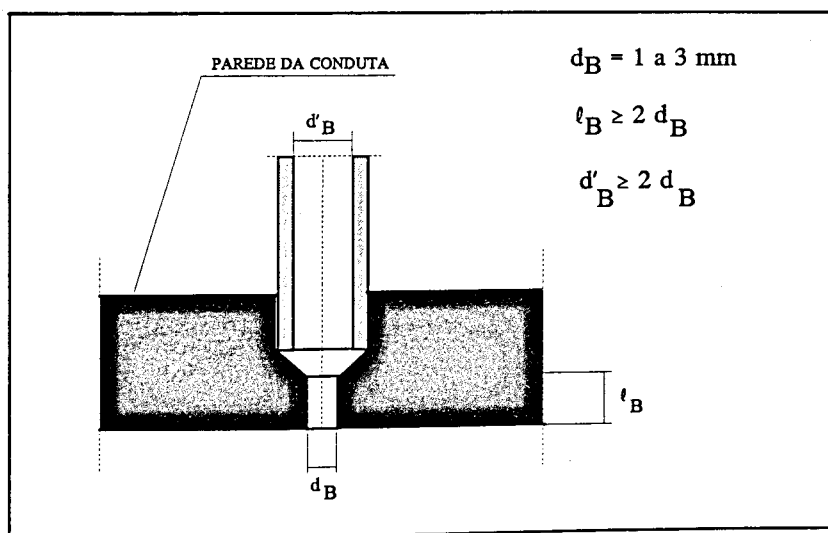


figura 66 – Configuração e relação aconselhada de dimensões numa tomada de pressão (adaptado de Tropea [82]).

Na instalação experimental realizada não foi possível realizar as tomadas de pressão com as características idênticas às propostas por Tropea.

Com efeito, as características do fluido estudado, em particular, a provável existência de partículas sólidas no escoamento com dimensões superiores a 1 mm e a presença de bolhas de biogás no interior do escoamento, obrigaram a executar orifícios com maiores dimensões de modo a evitar a sua obstrução e a permitir a purga rápida e fácil das bolhas de biogás que entram na tomada de pressão evitando, assim, a sua acumulação e formação progressiva de bolhas de maiores dimensões.

Optou-se, então, por executar uma tomada de pressão de configuração rectilínea e com um diâmetro interior de 6 mm, de acordo com o esquema apresentado na *figura 67*.

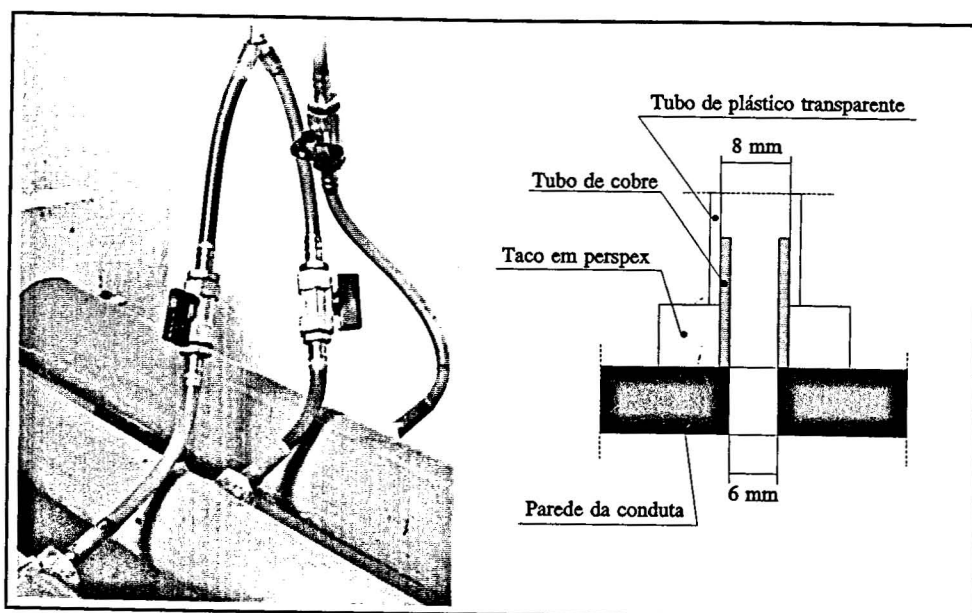


figura 67 – Configuração das tomadas de pressão utilizadas.

Os orifícios na conduta foram realizados por brocagem perpendicular ao eixo da tubagem. A aplicação posterior de lixa muito fina na superfície brocada permitiu remover todas as rebarbas e conferir à superfície uma textura lisa e uniforme.

Inicialmente as tomadas de pressão foram posicionadas verticalmente na conduta. No entanto, após os primeiros ensaios efectuados com lamas, verificou-se que este posicionamento dificultava muito as medições efectuadas devido à elevada quantidade de biogás que se escapava pelas tomadas de pressão, em especial quando os caudais escoados se aproximavam do seu valor máximo.

Sabendo que no escoamento de fluidos com uma componente gasosa, esta componente tem tendência a acumular-se na parte superior do escoamento, verificou-se que o posicionamento escolhido para as tomadas de pressão era o mais desadequado, tendo-se, por isso, efectuado uma rotação da conduta de cerca de 45° de modo a obter idêntica rotação na tomada de pressão.

Esta acção permitiu reduzir substancialmente o volume de biogás purgado nas tomadas de pressão e, assim, realizar as medições de pressão diferencial sem a ocorrência de perturbações frequentes e significativas.

6.3.4. Sistema de Purga do Biogás e Limpeza das Tubagens de Ligação entre as Tomadas de Pressão e o Transdutor Diferencial de Pressão.

A existência de biogás no escoamento obrigou a dimensionar um equipamento específico destinado a permitir a sua purga da tomada de pressão impedindo a sua acumulação indesejável na tubagem de ligação ao transdutor diferencial de pressão, onde poderia provocar alterações substanciais nos valores medidos.

Houve, também, necessidade de prever um sistema de ligação das tomadas de pressão ao transdutor diferencial de pressão capaz de evitar a entrada de lamas nas câmaras do transdutor e com capacidade para realizar, também, a limpeza rápida e eficaz da tubagem.

Para atingir todos estes objectivos projectou-se o sistema de funcionamento apresentado na *figura 68*.

Apresenta-se, em seguida, uma descrição dos princípios de funcionamento deste equipamento tendo em vista a realização das tarefas anteriormente referidas.

Antes da realização dos ensaios efectuou-se, sempre, a limpeza e enchimento com água da tubagem de ligação entre as válvulas localizadas imediatamente a jusante das tomadas de pressão e imediatamente a montante do transdutor diferencial de pressão.

Para proceder à limpeza, as válvulas referidas são fechadas e, em seguida, procede-se sequencialmente às seguintes tarefas:

- abertura da válvula de descarga da câmara pressurizada, colocando, deste modo, a câmara à pressão atmosférica e permitindo, assim, a evacuação da água de limpeza para esgoto;
- injeção de água sob pressão por uma das válvulas de limpeza existentes no quadro de comando das válvulas. Estabelece-se, assim, um escoamento de água entre o quadro de comando de válvulas e a câmara pressurizada que permite a limpeza sequencial das diferentes tubagens por simples manobra das respectivas válvulas existentes no quadro de comando;
- a limpeza, ou purga da zona da tubagem localizada entre o quadro de comando das válvulas e o transdutor diferencial de pressão pode ser obtida de dois modos. O primeiro consiste na abertura das válvulas que permitem a ligação do dispositivo de calibração das células de pressão à tubagem de ligação ao transdutor diferencial de pressão mantendo todas as restantes válvulas existentes nos circuitos fechadas. A posterior injeção de água pelas válvulas de limpeza, de modo idêntico ao referido anteriormente, permite o escoamento entre o quadro de comando das válvulas e o dispositivo de calibração das células de pressão permitindo a purga e limpeza dessa zona. Em alternativa poderia optar-se pelo movimento inverso deixando que a água existente no dispositivo de calibração das células de pressão se escoasse directamente para a atmosfera através das válvulas de limpeza.

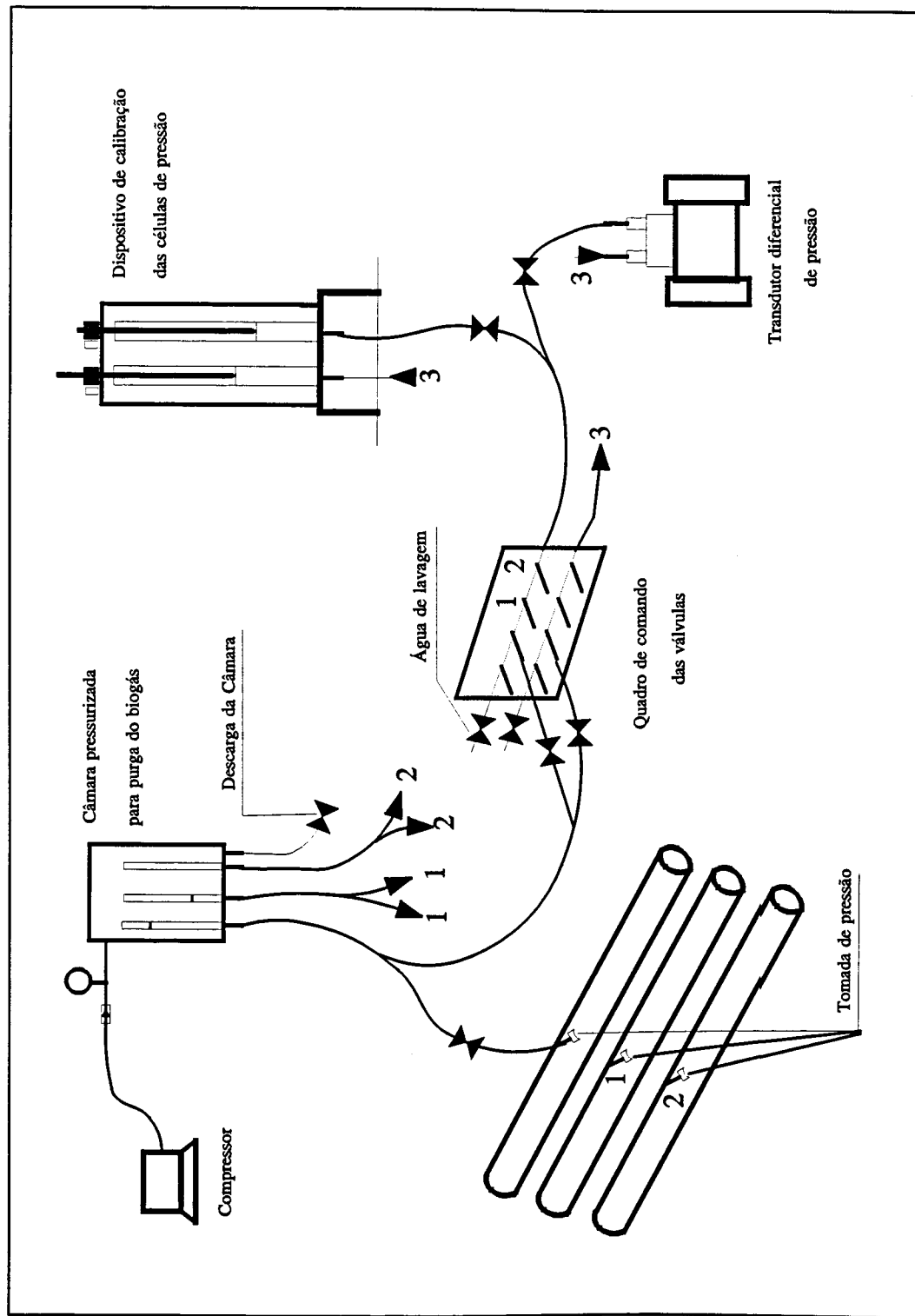


figura 68 – Sistema projectado para permitir a purga e limpeza da tubagem de ligação entre as tomadas de pressão e o transdutor diferencial de pressão.

Verifica-se, assim, que as únicas zonas da tubagem não acessíveis para limpeza são as seguintes:

- as zonas localizadas entre as válvulas de protecção ao transdutor e o transdutor diferencial de pressão que, por razões de protecção, é sempre isolado por fecho das válvulas antes de qualquer operação de limpeza dos circuitos;
- as zonas localizadas entre as tomadas de pressão e as válvulas de protecção às tomadas que são, também, fechadas para impedir a passagem de água para o interior das condutas do circuito hidráulico fechado ou, pelo contrário, para impedir a saída das lamas dessas condutas, durante a operação de limpeza das tubagens.

No entanto, consegue-se evitar a passagem de ar para zona localizada entre o transdutor diferencial de pressão e as válvulas de protecção ao transdutor prevendo um ponto alto na tubagem junto às válvulas e impedindo, assim, a progressão das bolhas de ar na direcção do transdutor diferencial de pressão.

Por sua vez, a purga da zona localizada entre as tomadas de pressão e as válvulas de protecção às tomadas faz-se, naturalmente, em condições de funcionamento da instalação.

As metodologias anteriormente descritas garantem, assim, a limpeza, purga e enchimento com água das tubagens de ligação entre as tomadas de pressão, a câmara pressurizada para purga do biogás, o quadro de comando de válvulas, o dispositivo de calibração das células de pressão e o transdutor diferencial de pressão, antes de se dar início a um ciclo de medições.

Apresentam-se, na *figura 69*, a câmara pressurizada destinada a purgar o biogás e o quadro de comando de válvulas, o dispositivo de calibração das células de pressão e o transdutor diferencial de pressão. É possível, ainda, visualizar por cima do transdutor diferencial de pressão o conversor de sinal do medidor electromagnético de caudal.

A ligação do sistema de medição de modo a permitir a leitura em contínuo da pressão diferencial entre as secções da conduta pretende pressupor a execução sequencial das seguintes funções:

- após o fecho da válvula de descarga da câmara pressurizada para purga do biogás, injecta-se ar comprimido na câmara elevando, lentamente, a pressão do ar no seu interior até atingir uma pressão próxima da prevista para o escoamento na conduta (em função do caudal escoado);
- procede-se, em seguida, cuidadosamente, ao equilíbrio de pressões entre a câmara pressurizada e o escoamento na conduta. Para isso, procede-se à abertura muito lenta de uma das válvulas de ligação ao escoamento na conduta equilibrando, em simultâneo, as pressões. Para isso, injecta-se mais ar comprimido na câmara pressurizada se se verificar a tendência para um movimento ascendente das lamas na tubagem ou, pelo contrário, retira-se um pouco de ar da câmara pressurizada, com auxílio da válvula de descarga, quando se verifica a tendência para um movimento descendente das lamas na tubagem.

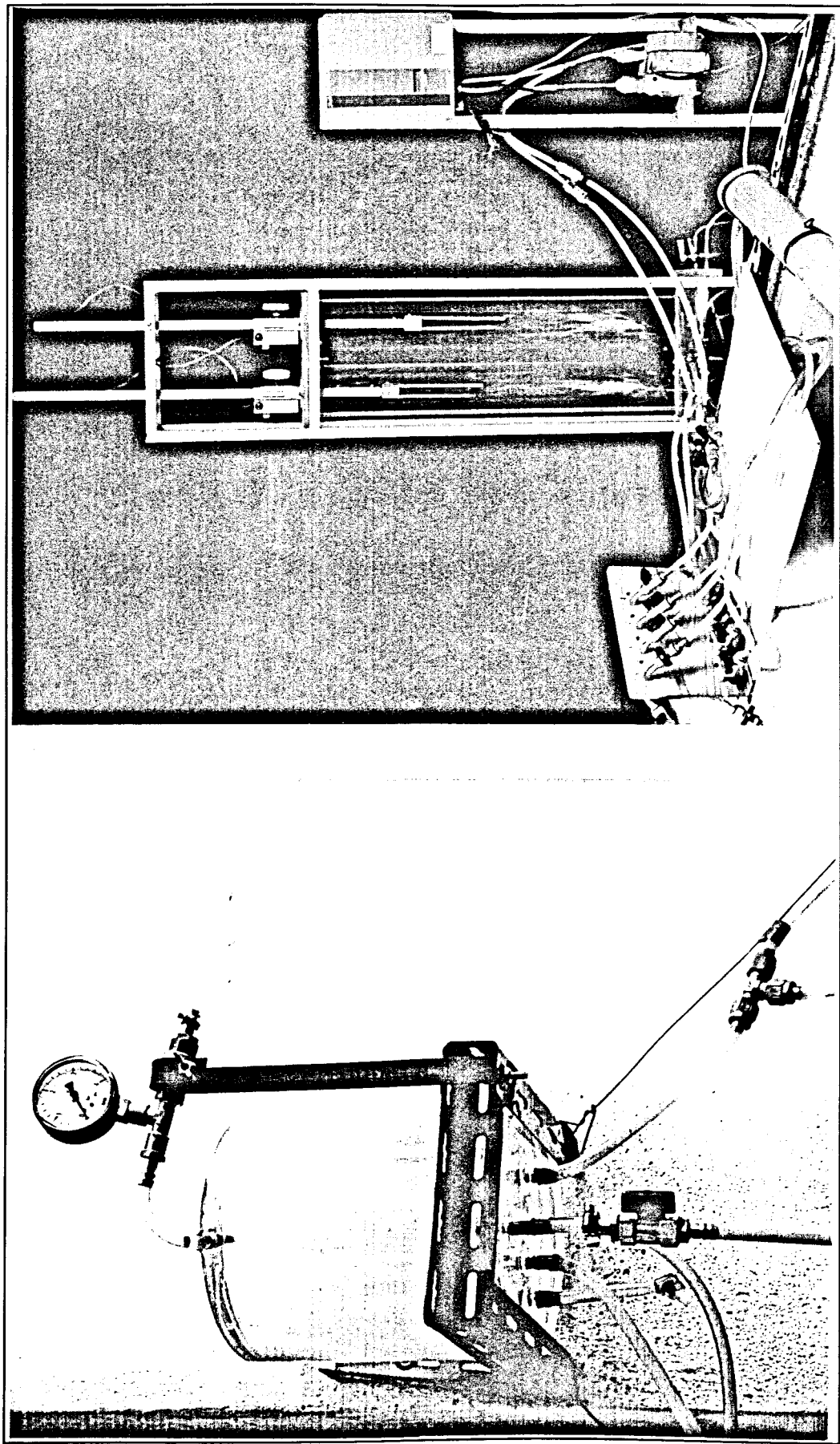


figura 69 – Equipamento utilizado para a medição da pressão diferencial.

- atingido o equilíbrio de pressões entre a câmara pressurizada e o escoamento na conduta, abrem-se, então, totalmente, as válvulas de ligação ao escoamento na conduta, as válvulas respectivas no quadro de comando de válvulas e, finalmente, as válvulas de ligação ao transdutor diferencial de pressão.

Após as operações descritas anteriormente, os circuitos hidráulicos de transmissão da pressão entre as duas tomadas de pressão existentes na conduta e as células do transdutor diferencial de pressão estão totalmente estabelecidos podendo-se dar início às leituras.

A tubagem utilizada nos circuitos hidráulicos, em plástico transparente, com diâmetro interior de 8 mm mostrou-se particularmente indicada para as funções previstas pois, para além de resistente e maleável, permite a fácil visualização do fluido e das bolhas de biogás no seu interior.

Conseguiu-se, assim, controlar facilmente o nível de separação entre as lamas e a água no interior da tubagem, de modo a nunca afastar muito esse nível da zona das tomadas de pressão mas impedindo, também, a entrada de água para o interior da conduta.

Com este sistema consegue-se manter uma linha bem definida de separação entre a lama e a água no interior da tubagem de ligação, se as manobras realizadas durante o ensaio, nomeadamente, com o variador de velocidade da "mohno"-bomba forem bastante lentas e progressivas de modo a evitar um movimento brusco da água no interior da tubagem. Neste caso, verifica-se a ocorrência indesejável de uma mistura rápida entre os dois líquidos.

Durante as experiências as bolhas gasosas de biogás entradas nas tomadas de pressão, em geral de muito pequena dimensão, ascenderam rapidamente pela tubagem até à câmara pressurizada e não introduziram, em geral, perturbações significativas nas medições efectuadas.

No entanto, quando se detectaram problemas nas medições, nomeadamente flutuações bruscas nos valores medidos, motivadas, em geral, pela ascensão de uma bolha de maiores dimensões na tubagem, o equipamento existente permitia fácil detecção devido ao grande desvio padrão existente num ciclo de leituras. Tal facto obrigava à anulação da leitura efectuada e a uma repetição da medição.

6.4. SISTEMA DE MEDIÇÃO, AQUISIÇÃO E AFERIÇÃO DOS DADOS

O sistema de medição, aquisição e aferição dos dados utilizado é bastante semelhante ao utilizado por Maia [50] sendo constituído pelos seguintes elementos:

- um medidor de pressão;
- um medidor de caudal;
- um sistema de aquisição de dados;
- um medidor de sinal eléctrico.

O equipamento utilizado permite a quantificação dos valores médios e dos valores quadráticos médios da pressão diferencial e do caudal.

O equipamento utilizado na medição destas grandezas é constituído por um transdutor diferencial de pressão e por um medidor electromagnético de caudal. Estes aparelhos convertem a grandeza física em estudo numa grandeza de saída proporcional que é, em geral, representada por um sinal eléctrico.

Os sinais eléctricos emitidos continuamente são enviados, em primeiro lugar, a unidades de tratamento de sinal, nomeadamente, conversores de sinal ou amplificadores e, em seguida, para um "interface" analógico-digital onde se procede à digitalização e codificação de amostragens sequenciais discretizadoras de sinal, sendo, por último, processados em computador utilizando para o efeito programas adequados para obtenção dos parâmetros estatísticos.

Como equipamento auxiliar de controlo refere-se, ainda, o equipamento utilizado na medição dos sinais eléctricos enviados.

6.4.1. Medidores de Pressão

O equipamento utilizado na medição da pressão diferencial foi um transdutor eléctrico de pressão do tipo capacitivo, marca Rosemount, integrado num transmissor de pressão modelo 3051 CD com gama de medida ajustável até um máximo de 0 a 5,22 kPa.

Apresenta-se, na *figura 70*, o transdutor de pressão diferencial utilizado na instalação experimental.

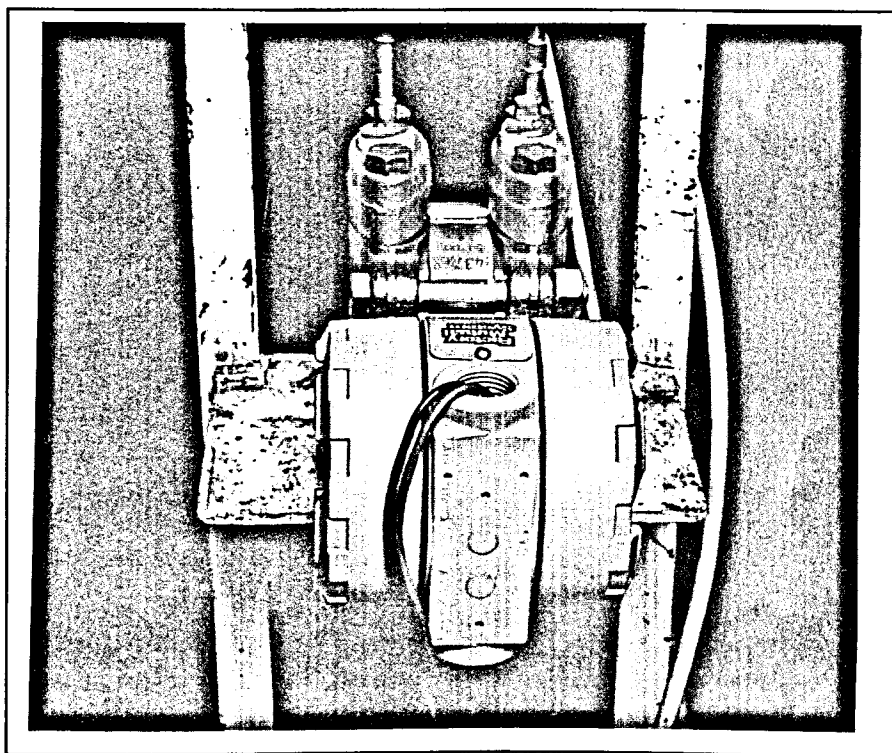


figura 70 – Transdutor de pressão diferencial utilizado.

O princípio de funcionamento do transdutor baseia-se na deformação sofrida por uma membrana, devida à acção do diferencial de pressão existente nos dois lados. A pressão a medir é transmitida, por intermédio de diafragmas isolantes e de óleo de silicone, a um diafragma sensor localizado no centro da célula capacitiva. Placas condensadoras localizadas de ambos os lados do diafragma sensor detectam a sua posição.

A pressão diferencial é, assim, directamente proporcional à variação de capacidade entre o diafragma sensor e as placas condensadoras. A variação de capacidade entre o diafragma sensor e as placas condensadoras adjacentes é, por último, convertida num sinal eléctrico, contínuo, variável entre 4 e 20 mA.

Apresenta-se, na *figura 71*, um esquema do princípio de funcionamento da unidade sensora.

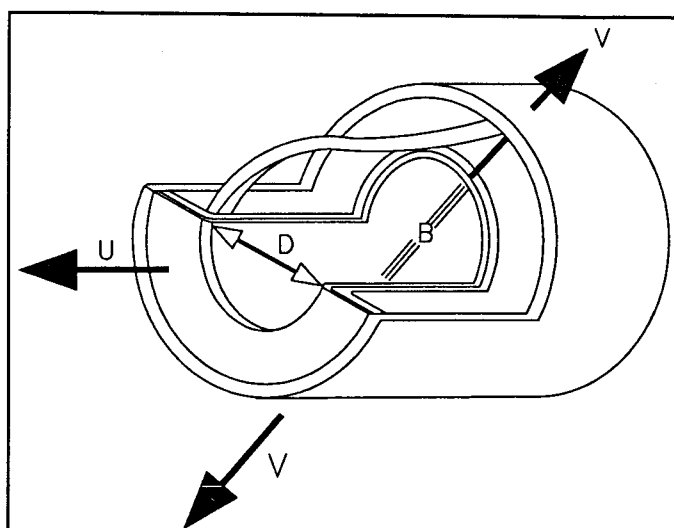


figura 71 – Caracterização da unidade sensora.

O sinal eléctrico emitido é, em seguida, digitalizado num conversor analógico-digital integrado na unidade, sendo, então, tratado numericamente no microprocessador que, além de efectuar o controlo operacional da unidade, permite, também, regulações do zero, da gama de medida e comunicações à distância. Controla, ainda, o conversor digital-analógico para a saída de sinal de 4 a 20 mA.

A comunicação à distância referida, é efectuada por uma consola **Rosemount**, modelo 268 dotada de teclas destinadas à operação e comando e de um mostrador digital. Esta consola permite efectuar a configuração da unidade de medida, o seu controlo e, também, realizar diagnósticos de operação e o seu próprio teste.

Este "interface" acede directamente ao sinal numérico do microprocessador, transmitido por sinal de alta frequência sobreposto ao sinal de corrente (4 a 20 mA).

Por último, o sinal de saída (4 a 20 mA) é convertido em sinal em tensão (0 a 10 volts), através de uma unidade conversora integrada na unidade de alimentação- fonte de alimentação/conversão **Rosemount NG22**.

A *figura 72* esquematiza o princípio de funcionamento anteriormente descrito.

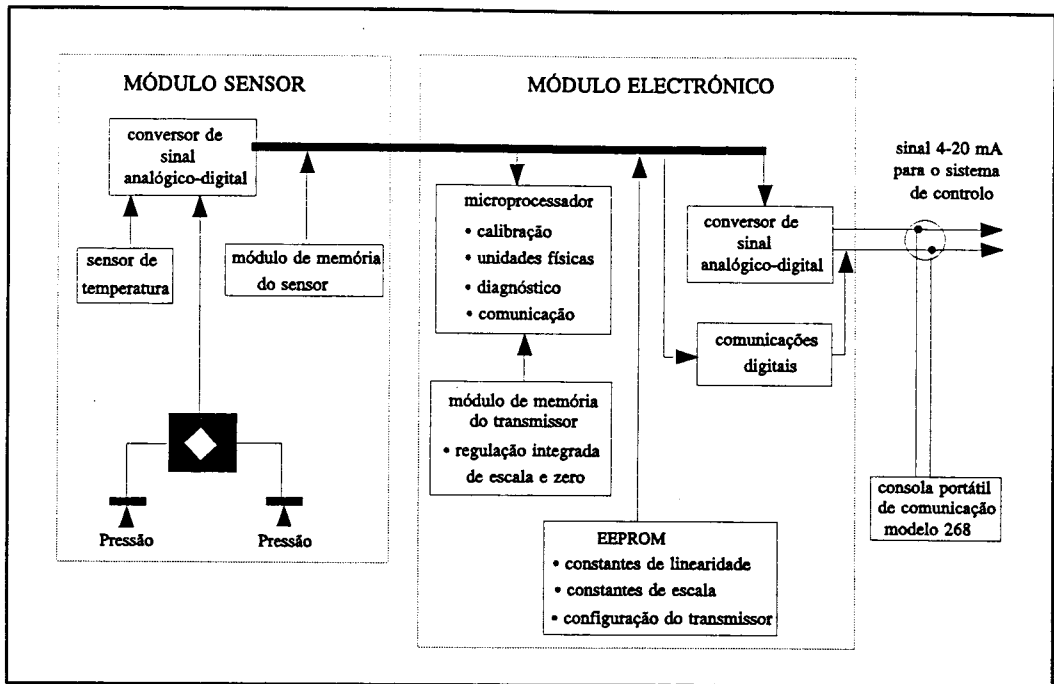


figura 72 – Esquema de funcionamento do transmissor de pressão diferencial Rosemount 3051CD

6.4.2. Medidor de Caudal

A medição do caudal no circuito hidráulico fechado da instalação experimental foi realizada com um medidor electromagnético de caudal da marca **Magflo** da **Danfoss**. Este medidor de caudal é constituído por duas unidades distintas; a unidade sensora e a unidade conversora.

Apresentam-se, na *figura 73*, as duas unidades constitutivas do medidor de caudal. A unidade sensora é constituída por um sensor do tipo **MAG 1100** com um diâmetro interno de **25 mm** e, por sua vez, a unidade conversora é do tipo **MAG 1000**.

O princípio de funcionamento dos medidores electromagnéticos de caudal baseia-se na aplicação do princípio da indução electromagnética de *Faraday* segundo o qual a tensão induzida gerada por um condutor eléctrico quando atravessa perpendicularmente, com uma dada velocidade, um campo magnético com uma determinada intensidade, é proporcional à velocidade do condutor eléctrico.

Então, sendo **B** a intensidade do campo magnético e **K_A** uma constante do aparelho, a tensão induzida gerada pela passagem do condutor eléctrico, **V**, é dada pela seguinte expressão:

$$V = K_A B U D \quad (276)$$

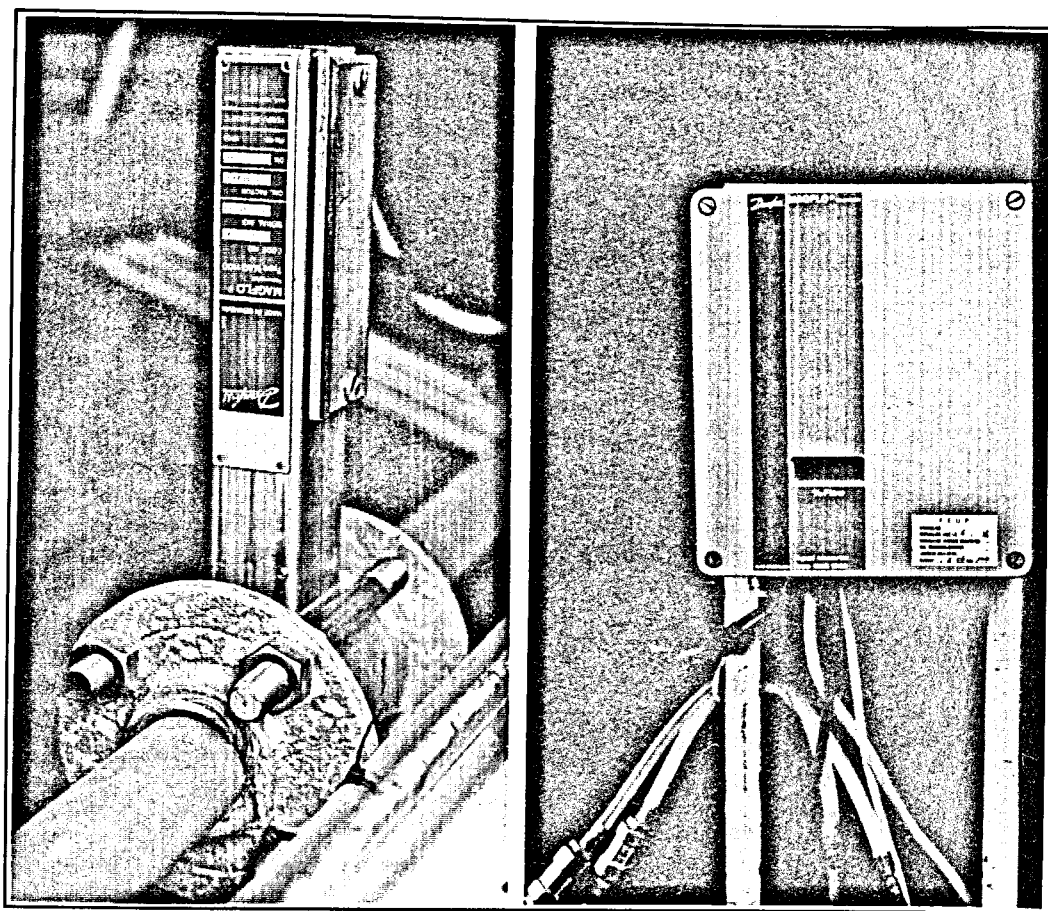


figura 73 – Medidor electromagnético de caudal utilizado.

Conclui-se, assim, que, quando a intensidade do campo magnético é constante, a tensão induzida é directamente proporcional à velocidade média do escoamento. É, então, possível determinar o caudal escoado na zona de medida a partir do simples conhecimento do diâmetro do escoamento nessa zona.

Apresenta-se, na *figura 74*, a aplicação do princípio de *Faraday* ao caso da medição de caudal no escoamento de um fluido no interior de uma conduta. Neste caso, o condutor eléctrico é o líquido escoado e a tensão induzida é medida por dois eléctrodos a uma distância idêntica à do diâmetro interior da unidade sensora.

A tensão induzida é recebida por dois eléctrodos montados na superfície interior da unidade sensora, fazendo um ângulo de 180° entre si. Estes eléctrodos, alimentados pela unidade conversora com uma corrente eléctrica de polaridade alternadamente positiva e negativa, emitem um sinal de saída para a unidade conversora, onde é tratado e convertido de uma tensão magnética induzida num sinal de saída com um valor apropriado, em geral, 0 a 20 a 4 a 20 mA. O sinal de saída segue, então, para os "interfaces" existentes para ser visualizado e/ou registado.

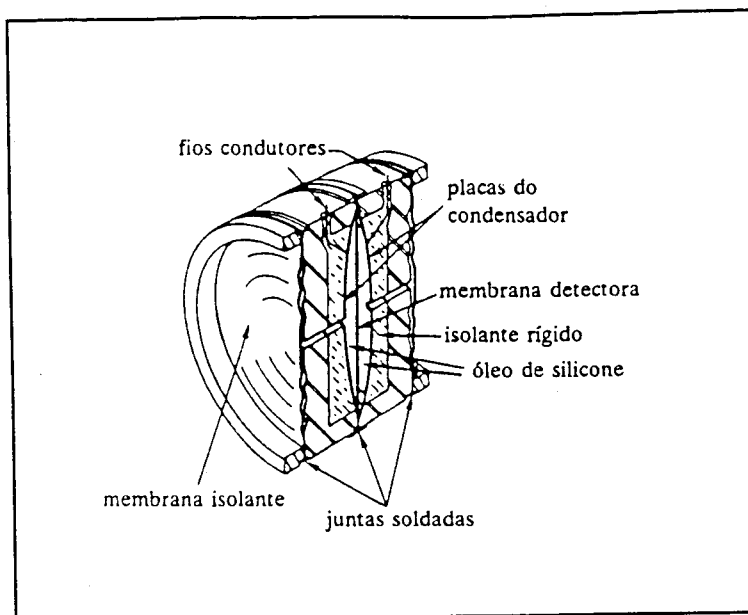


figura 74 – Princípio de funcionamento do medidor electromagnético de caudal.

O medidor **Magflo** da **Danfoss** utilizado na instalação experimental permite a realização do ajuste da gama de medida entre 0 a 0,25 m/s a 0 a 10 m/s.

Neste tipo de aparelhos importa, no entanto, referir que, quanto mais rápido for o escoamento na secção de medida, maior será o valor instantâneo da tensão nos eléctrodos e menor será o erro verificado. Por este motivo, optou-se por realizar a instalação de um medidor de caudal com um diâmetro interior de 25 mm o que permite obter uma gama de velocidades de medição de 0,7 a 1,7 m/s.

A unidade conversora está dotada de um digitalizador de quatro dígitos onde se indica o valor medido em percentagem do valor máximo da gama ajustada e permite, ainda, escolher o tempo de integração do valor medido entre 2 e 20 s.

Apresenta-se, na *figura 75*, a gama de erro do medidor electromagnético de caudal utilizado, em percentagem relativamente ao valor do caudal medido.

Para garantir o rigor dos valores medidos, evitando possíveis interferências motivadas por singularidades existentes no escoamento, o medidor de caudal foi instalado na parte central do trecho rectilíneo de retorno ao reactor biológico.

Atendendo a que a conduta na zona exterior à zona de teste tem um diâmetro de 2", houve necessidade de realizar um trecho a montante e a jusante do medidor em conduta de 1", destinado a garantir a inexistência de perturbações devidas a uma mudança súbita de diâmetro no local de instalação do aparelho. Realizou-se, assim, um trecho com 3,0 m a montante e outro com 2,3 m a jusante do medidor de caudal em conduta de 1".

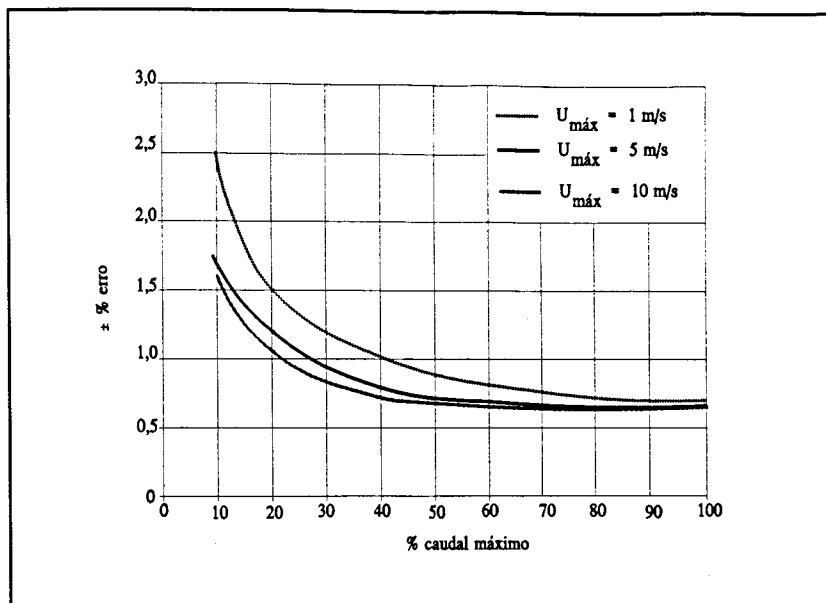


figura 75 – Gama de erro do medidor de caudal Magflo da Danfoss.

6.4.3. Sistema de Aquisição de Dados

A aquisição de dados foi realizada utilizando uma unidade de aquisição de dados modelo GPIS (*General Purpose Interface System*), fabricada pela **Digital Design and Development, Ltd (3D)**.

Apresenta-se, na *figura 76*, a unidade de aquisição de dados utilizada.

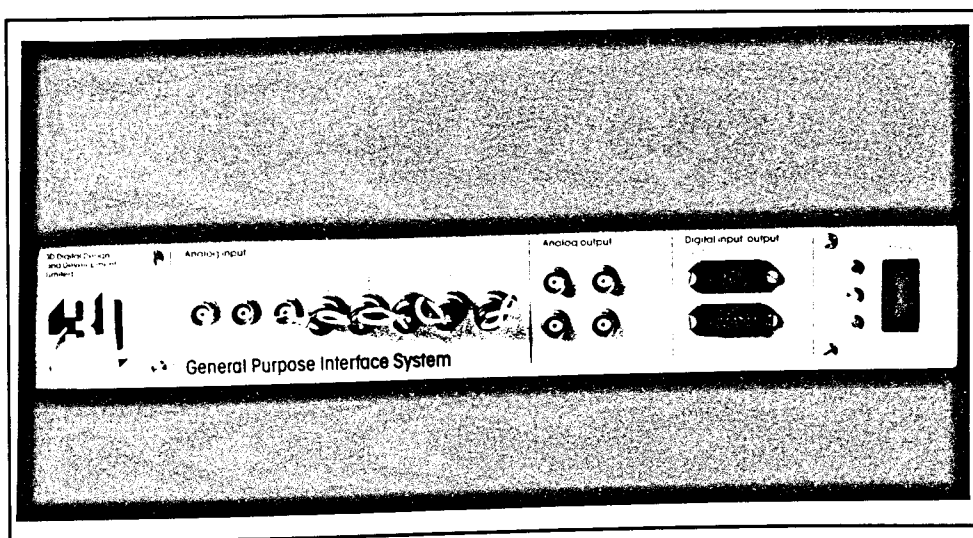


figura 76 – Unidade de aquisição de dados GPIS.

Esta unidade de aquisição de dados dispõe de oito canais diferenciais com entrada analógica e gama de entrada em tensão programável de 0 a ± 100 milivolts até 0 a ± 10 volts.

Dispõe, ainda, de um conversor analógico-digital de 12 "bits" de resolução, permitindo amostragens teóricas de sinal até 40 000 amostras/s. Refere-se, no entanto, que este valor perde significado quando se pretende a visualização no monitor do computador dos valores medidos.

Durante a realização das medições, obtiveram-se valores reais da ordem das 60 a 80 amostras/s/canal, para ensaios em que estavam dois canais a funcionar em simultâneo.

A comunicação entre a unidade de aquisição de dados e o computador é conseguida através de uma carta de expansão que permite a transmissão de dados em paralelo.

O controlo das operações efectuadas por este "interface" foi realizado por um computador, utilizando um programa desenvolvido para o efeito por *Maia* [50], mas adaptado às especificidades existentes no presente trabalho.

O programa desenvolvido permite, então, efectuar as seguintes operações:

- selecção dos canais onde se pretendem realizar leituras;
- escolha do número de leituras a realizar;
- programação das relações de calibração mais adequadas;
- definição da grandeza a medir e das unidades utilizadas;
- registo dos resultados obtidos em ficheiro.

A calibração é efectuada com recurso a duas relações de calibração.

A primeira relação diz respeito à calibração da "interface" e é função do sinal máximo em tensão programado. Nesta instalação, a unidade GPIS da 3D utilizada foi regulada para a gama de sinais de entrada de 0 a ± 10 volts. Por sua vez, a saída binária do conversor para o computador corresponde a 0 para -10 volts, 2050 para 0 volts e 4095 para +10 volts.

A aplicação do programa GPISNB desenvolvido por *Feyo de Azevedo* e *Nuno Bastos* para efectuar o teste de "interface" deste tipo, permitiu obter os dados para cálculo da respectiva função de ajuste.

Então, por aplicação do método dos mínimos quadrados aos pares de valores (volts, saída binária), foi possível obter a seguinte função de ajuste:

$$sb = 2050 + 205 V \quad (277)$$

A inserção desta relação de calibração do conversor no programa GPIS garante que o valor obtido no computador corresponde ao valor da tensão emitida e, também, medida nos voltímetros digitais existentes no sistema.

Por sua vez, a segunda relação de calibração relaciona o valor da grandeza medida, *G*, com o valor da tensão, *V*, do sinal que entra na unidade, por uma equação do tipo:

$$G = aV + b \quad (278)$$

A obtenção das constantes **a** e **b** da recta de ajuste exige a realização de ensaios destinados à calibração do equipamento que se descrevem em 6.5..

Durante a realização dos ensaios experimentais recorreu-se a dois computadores, um destinado a realizar a aquisição de dados em laboratório e outro para efectuar a análise e tratamento dos dados recolhidos.

Para realizar a aquisição de dados em laboratório optou-se por um computador **Armstrad PC 1512** com **512 Kbytes** de memória **RAM** e **20 Mbytes** disponíveis em disco. Por sua vez, para análise e tratamento dos dados obtidos utilizou-se um computador **Hewlett-Packard 486/33VL** com **640 Kbytes** de memória **RAM**, dotado de extensão de memória de **3072 Kbytes** e **240 Mbytes** disponíveis em disco.

6.4.4. Medidores de Sinal Eléctrico

Para aferir e controlar o sinal de saída do transdutor diferencial de pressão **Rosemount** e do medidor electromagnético de caudal **Magflo** utilizaram-se dois voltímetros digitais de valor médio, da marca **Norma MP 13**.

Estes aparelhos têm uma capacidade de digitalização de três dígitos e meio e permitem caracterizar o sinal eléctrico em tensão ou em corrente. A sua precisão é de **0,7% (AC)** e de **0,2% (DC)** e, para além da medição da tensão em corrente alterna ou contínua, permitem, ainda, a quantificação da resistência, temperatura e frequência.

6.5. CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO

6.5.1. Transdutor Diferencial de Pressão

Para calibração estática do transdutor diferencial de pressão utilizou-se o dispositivo apresentado na *figura 77*, existente no *Laboratório de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente* e destinado à calibração de transdutores de pressão relativa.

Neste dispositivo as duas câmaras do transdutor diferencial de pressão são ligadas a uma das duas bases niveladas dos dois pequenos reservatórios de calibração, em perspex, com uma secção circular e com cerca de **70 cm** de altura.

A entrada e saída da água de cada um dos dois reservatórios bem como a conexão ao transdutor é comandada por um sistema de válvulas independentes, permitindo-se, ainda, a intercomunicação entre os dois reservatórios por meio da abertura de uma outra válvula. O nível da água em cada um dos reservatórios é controlado, rigorosamente, por meio do limnómetro de olho catódico correspondente.

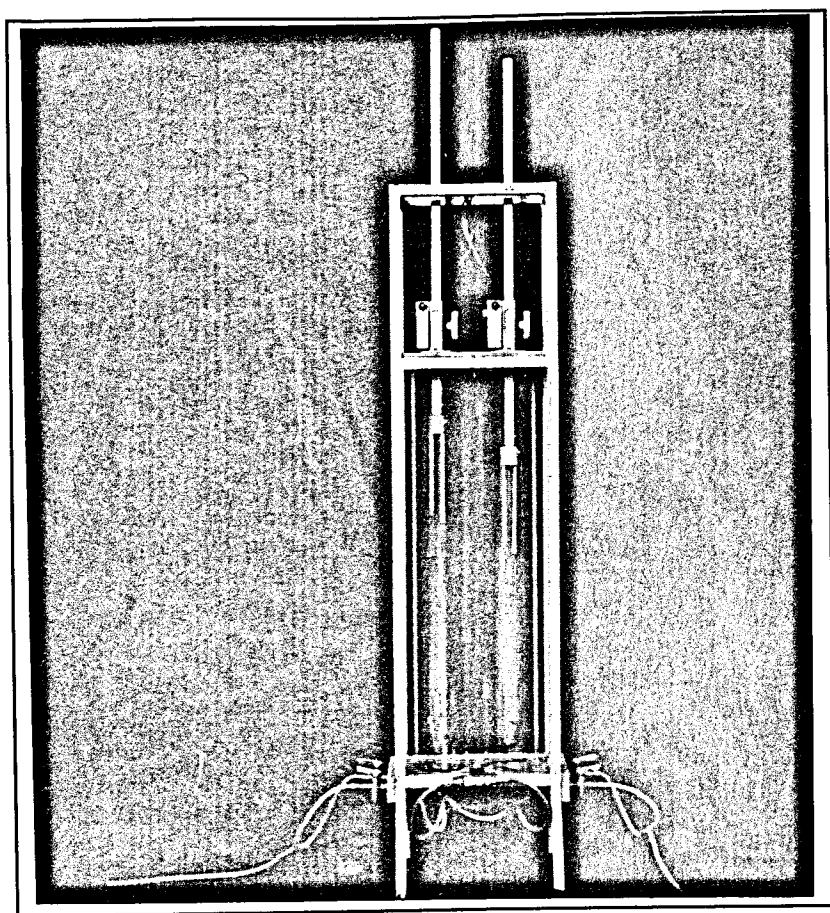


figura 77 – Dispositivo utilizado para calibração do transdutor diferencial de pressão.

Apresenta-se, na *figura 78*, o esquema global do dispositivo utilizado, podendo-se observar que a alimentação dos reservatórios utilizados na calibração é efectuada a partir de um pequeno reservatório, também em perspex, localizado por baixo da mesa de suporte do dispositivo de calibração.

Este reservatório recebe, ainda, a água proveniente das descargas efectuadas durante a operação de calibração ou de simples esvaziamento dos reservatórios de calibração.

A bomba utilizada para elevar água para os reservatórios de calibração tem uma potência de 60 W e permite obter uma variação lenta, mas contínua, da água no interior dos reservatórios de calibração, podendo as correspondentes diferenças de cotas entre os reservatórios ser determinadas por diferença dos valores medidos nos respectivos limnímetros de olho catódico.

A inserção, em paralelo, do dispositivo de calibração no circuito de comunicação entre as tomadas de pressão e o transdutor diferencial de pressão, permitiu efectuar testes de aferição do sinal do aparelho sempre que tal operação foi considerada oportuna, em particular, antes do início de uma nova série de ensaios ou após períodos de repouso mais prolongados.

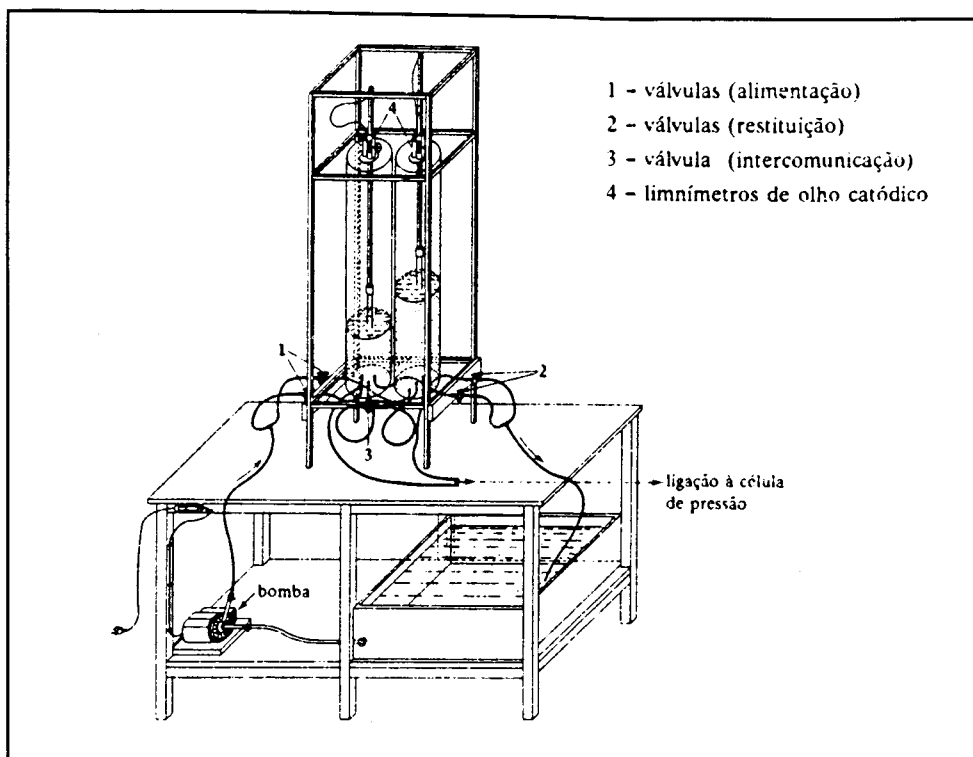


figura 78 - Esquema global do dispositivo de calibração das células de pressão.

Durante a fase de calibração seguiu-se a metodologia descrita por *Maia* [50] que corresponde à comparação do valor da tensão indicado no multímetro digital (ligado à célula de pressão), com a pressão diferencial correspondente ao desnível entre os reservatórios de calibração.

Efectuaram-se medições ao longo de ciclos de enchimento e esvaziamento de um dos reservatórios enquanto que no outro o nível da água era mantido fixo. A amplitude das medições efectuadas durante a calibração foi sempre suficientemente elevada para incluir a gama de valores previsíveis nas medições efectuadas no decurso dos testes efectuados.

Apresenta-se, na *figura 79*, uma representação da recta de calibração utilizada bem como uma comparação entre os valores medidos em três operações distintas de calibração.

O diagrama apresenta a relação entre as tensões medidas, em volts, e as pressões diferenciais, em mm de coluna de água, aplicadas sobre a célula. A recta de ajuste foi obtida por aplicação do método dos mínimos quadrados aos valores obtidos no ensaio de calibração.

Os resultados obtidos confirmam a adequação dos valores adoptados para a recta de ajuste ao longo do período em que decorreram os ensaios experimentais.

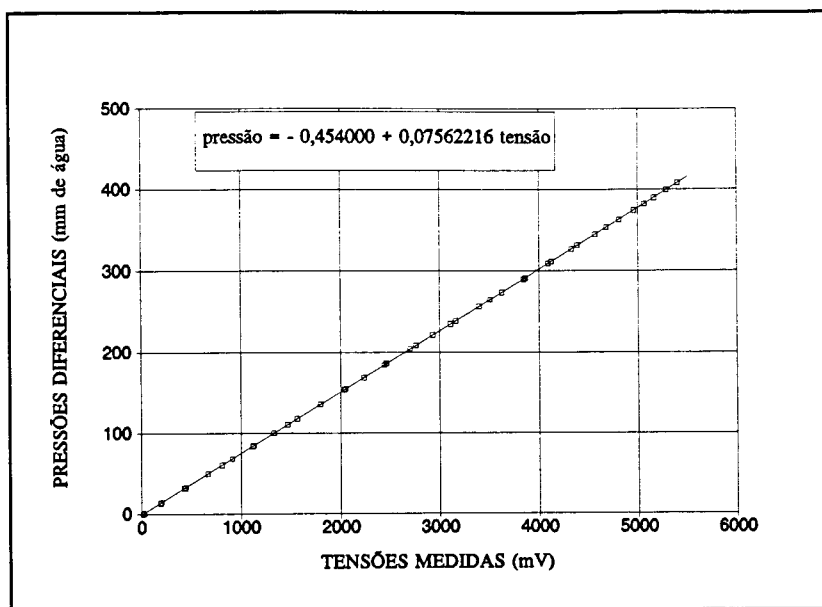


figura 79 – Calibração estática do transdutor diferencial de pressão.

6.5.2. Medidor Electromagnético de Caudal

Efectuou-se a calibração do medidor de caudal por comparação dos valores indicados pelo medidor com medições volumétricas efectuadas a caudal constante. Os valores emitidos pelo medidor de caudal foram obtidos em computador, através do "interface" analógico-digital, tendo-se efectuado leituras de séries de 1000 amostras.

Por sua vez, as medições volumétricas efectuadas consistiram na determinação do tempo de enchimento do reservatório existente na instalação experimental e utilizado para efectuar a sua limpeza.

Assim, na fase de ensaios preliminares, quando a instalação foi testada com água, procedeu-se à aferição do volume do reservatório e, posteriormente, ligou-se uma mangueira entre a válvula da tomada de amostras existente na instalação experimental e o referido reservatório. A quantificação do tempo de enchimento do reservatório foi realizada com auxílio de um cronómetro.

Para cada caudal de alimentação testado realizaram-se pelo menos três medições do tempo de enchimento necessário, tendo-se obtido o caudal de calibração resultante por média aritmética dos valores dos caudais correspondentes a cada uma das medições efectuadas nessa série.

Apresenta-se, na *figura 80*, o diagrama de calibração do medidor de caudal Magflo utilizado na instalação experimental, ajustado para a gama de 0 a 1 ℓ/s (correspondendo 1 ℓ/s a um sinal eléctrico de 10 volts).

Atendendo ao rigor atingido na medição efectuada, não se procedeu a qualquer correcção específica ao valores fornecidos pelo medidor de caudal tendo-se adoptado, neste caso, a equação de calibração $Q=0,1 V$ (ℓ/s).

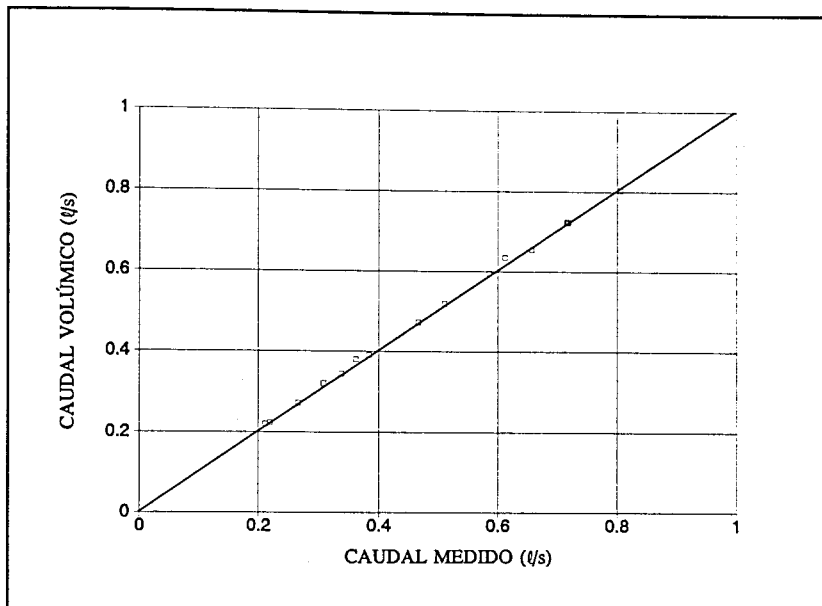


figura 80 – Calibração do medidor de caudal.

6.6. ENSAIOS REOLÓGICOS

Os ensaios reológicos foram realizados num reómetro da marca **Rheolab MC 100** da **Physica**.

Apresenta-se, na *figura 81*, o local onde foram realizados os ensaios reológicos.

O equipamento utilizado nos ensaios reológicos é constituído pelos seguintes elementos:

- uma unidade electrónica, **Rheolab MC 100**;
- uma unidade universal de medida, **UM**;
- geometrias para realização dos ensaios reológicos;
- uma unidade de aquisição, tratamento e registo dos dados;
- uma unidade para controlo da temperatura durante o ensaio, **Viscotherm VT 10**.

Apresenta-se, na *figura 82*, o esquema de funcionamento do equipamento destinado à realização dos ensaios reológicos.

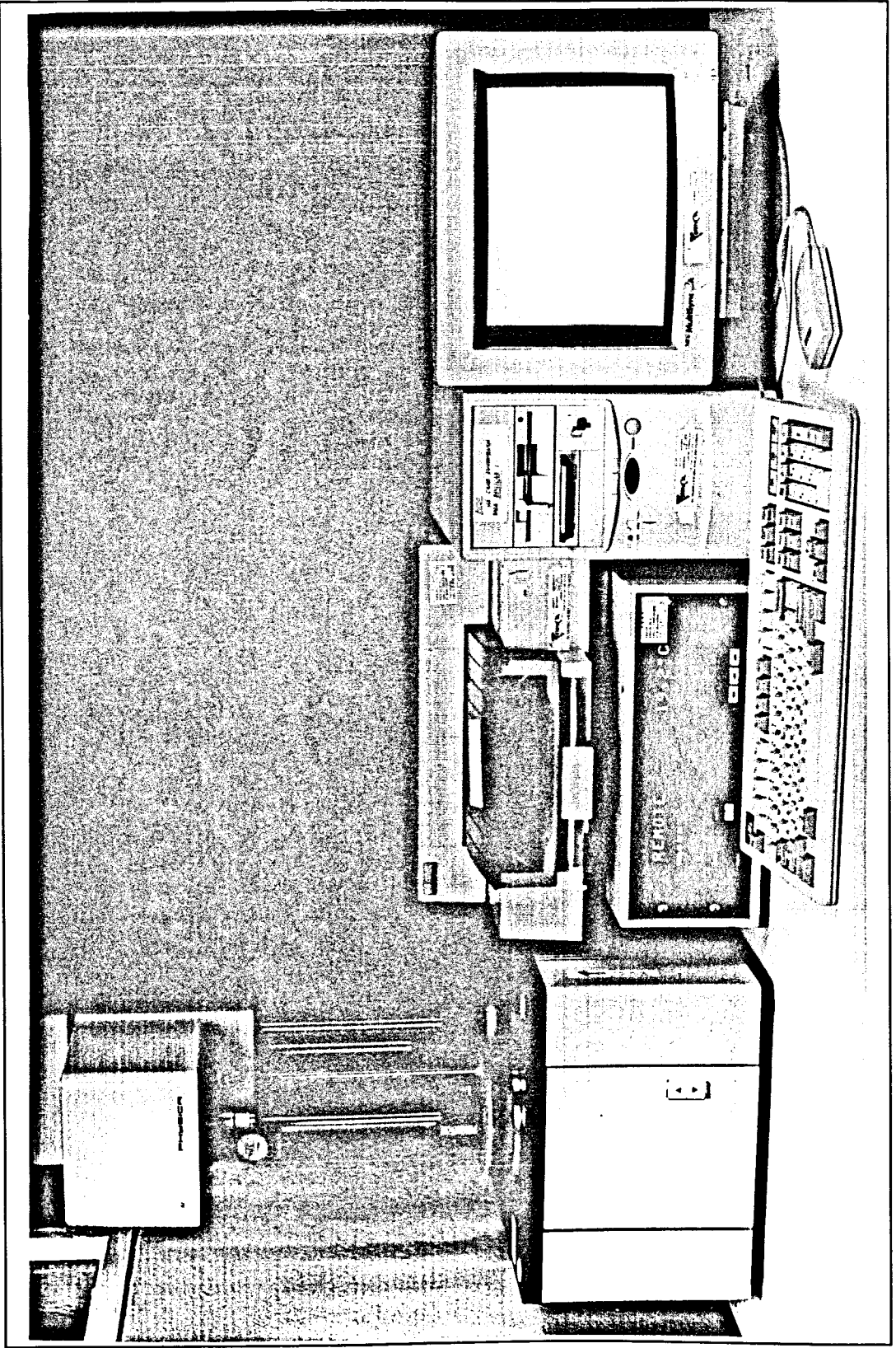


figura 81 – Instalação destinada à realização de ensaios reológicos.

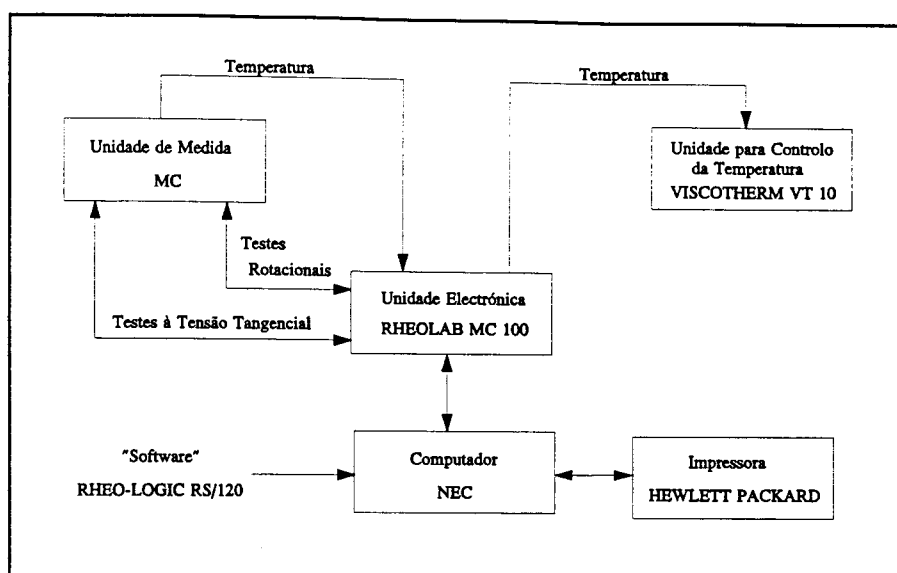


figura 82 – Esquema de funcionamento do equipamento destinado à realização dos ensaios reológicos.

6.6.1. Unidade Electrónica

A unidade electrónica de medida Rheolab MC 100 realiza o controlo das condições de funcionamento da unidade universal de medida, UM e pode ser programada manualmente a partir dos comandos existentes no seu painel ou, em alternativa, automaticamente a partir de um computador com "software" apropriado.

Apresentam-se, no *quadro 5*, as especificações técnicas da unidade electrónica utilizada.

PARÂMETRO	VALOR
erro máximo	$\pm 1\%$ do valor máximo
momento (valor máximo)	0,05 Nm
momento (resolução)	$0,05 \times 10^{-3}$ Nm
gama de medida da velocidade de rotação	0,01 a 800 min^{-1}
ângulo medido (resolução)	$0,03 \times 10^{-3}$ rad
gama de medida da velocidade de deformação angular	10^{-4} a $5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$
gama de medida da tensão tangencial	7×10^{-3} a $2,5 \times 10^5 \text{ Pa}$
gama de medida da viscosidade	10^{-3} a $3 \times 10^9 \text{ Pa.s}$
gama de medida de temperatura	-40 a 500°C

quadro 5 – Especificações técnicas da unidade electrónica Rheolab MC 100.

Durante os ensaios reológicos efectuados procedeu-se sempre ao controlo automático da unidade electrónica. Seleccionou-se, assim, na unidade electrónica, o modo de operação nº 9 correspondente à programação por via remota.

No modo de operação por via remota, recorre-se ao controlo remoto por computador, com auxílio do "software" **Rheo-logic RS 120** utilizando um "interface" **RS-232-C** para conexão entre os dois equipamentos. Com este "software" é possível realizar os seguintes testes reológicos:

- testes rotacionais (medição da tensão tangencial controlando o valor da velocidade de deformação angular existente no dispositivo rotativo da geometria utilizada);
- testes à tensão tangencial (medição da velocidade de deformação angular controlando o valor da tensão tangencial aplicada sobre a amostra de fluido ensaiada).

Os testes rotacionais permitem a realização das seguintes determinações:

- medições simples;
- traçado dos diagramas reológico e de viscosidade;
- traçado da relação viscosidade/tempo;
- traçado do diagrama reológico/temperatura;
- traçado da relação viscosidade/temperatura.

Por sua vez, os testes à tensão tangencial são, em geral, realizados complementarmente aos testes rotacionais e permitem, por exemplo, obter um maior rigor nas determinações para muito baixos valores da tensão tangencial.

Com estes testes são, então, possíveis as seguintes determinações:

- medições simples;
- traçado dos diagramas reológico e de viscosidade;
- traçado da relação viscosidade/tempo;
- traçado do diagrama reológico/tempo;
- traçado da relação viscosidade/temperatura;
- "creep test".

6.6.2. Unidade Universal de Medida

A unidade universal de medida, UM, é o aparelho onde se realizam os ensaios reológicos propriamente ditos. Esta unidade é composta pelos seguintes elementos principais:

- uma unidade básica para inserção dos dispositivos necessários à realização dos testes reológicos que inclui um recipiente para aplicação do dispositivo fixo e um braço motorizado que permite o acoplamento do dispositivo rotativo da geometria pretendida;
- um ajuste motorizado da altura de inserção do equipamento de medida, com deslocamento a duas velocidades, destinado a permitir o posicionamento rigoroso do dispositivo rotativo;

- dispositivos mecânicos e electrónicos de controlo e segurança;
- sistemas específicos para cada geometria existente destinados a permitir o controlo rigoroso da temperatura da amostra durante a realização do ensaio.

6.6.3. Geometrias Utilizadas

Nos ensaios reológicos efectuados, os cilindros concêntricos são a única geometria que revelou possuir características apropriadas para efectuar medições nas lamaz.

Efectivamente, constatou-se que a utilização de outras geometrias, nomeadamente, o cone e prato, é totalmente desapropriada pois a existência de um elevado número de partículas sólidas de variadas dimensões nas lamaz e, mesmo, a fraca consistência exibida pelas lamaz inviabilizam, desde logo, a realização dos ensaios reológicos.

Durante a primeira fase das experiências efectuadas a única geometria disponível era do tipo cilindros concêntricos, modelo MS-Z1 DIN, que se revelou pouco fiável, embora tenha permitido a realização de alguns testes. No entanto, as grandes flutuações exibidas nas leituras para situações de teste semelhantes, inviabilizou a consideração dos resultados obtidos.

O modelo MS-Z1 DIN utilizado respeita as especificações da norma DIN 54453 e tem as características técnicas apresentadas na *figura 83* e no *quadro 6*.

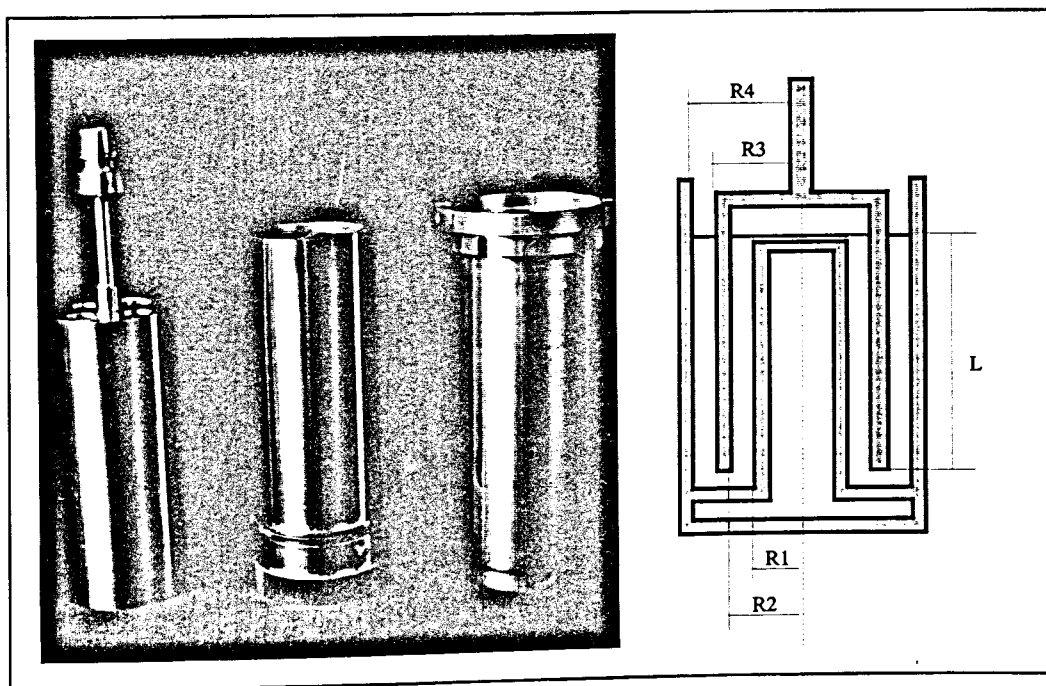


figura 83 – Cilindros concêntricos, modelo MS-Z1 DIN.

PARÂMETRO	VALOR
sistema de medida	Z1 DIN
volume da amostra (cm ³)	17
relação entre os raios ($R_2/R_1 = R_4/R_3$)	1,021
raio interior do cilindro rotativo, R_2 (cm)	2,275
raio exterior do cilindro rotativo, R_3 (cm)	2,35
raio interior do cilindro estático, R_1 (cm)	2,225
raio exterior do cilindro estático, R_4 (cm)	2,4
comprimento de medida, L (cm)	11,1
coeficiente de resistência do cilindro	1

quadro 6 – Especificações técnicas do modelo MS-Z1 DIN.

A impossibilidade de obter resultados rigorosos e minimamente fiáveis com esta geometria deve-se, em princípio, ao reduzido espaço existente entre as superfícies dos dois cilindros.

Efectivamente, no final dos ensaios, eram visíveis zonas na superfície do cilindro interior, rotativo, onde ocorriam aglomerações de partículas sólidas (aglomeradas pela presença de alguns sólidos de natureza fibrosa), que atingiam dimensões da ordem de grandeza do espaço existente entre os cilindros.

Verificada a impossibilidade de obter resultados rigorosos a partir da geometria anteriormente referida, optou-se por adquirir a geometria **MS-Z2 DIN** com que se realizaram, com sucesso, os ensaios experimentais durante a segunda fase das experiências.

O modelo **MS-Z2 DIN** obedece à norma **DIN 53019** e tem as características técnicas apresentadas na *figura 84* e no *quadro 7*.

Durante os ensaios reológicos realizados com esta geometria não se detectaram os problemas referidos durante a realização dos ensaios com o primeiro cilindro utilizado. No entanto, os resultados obtidos indiciam a ocorrência de deslizamento para baixas velocidades de rotação.

Considera-se perfeitamente plausível a ocorrência de condições propícias ao deslizamento nos ensaios com este tipo de cilindros, pois a sua construção em aço inoxidável e a superfície em contacto com o fluido extremamente lisa são bastante favoráveis à ocorrência desse fenómeno.

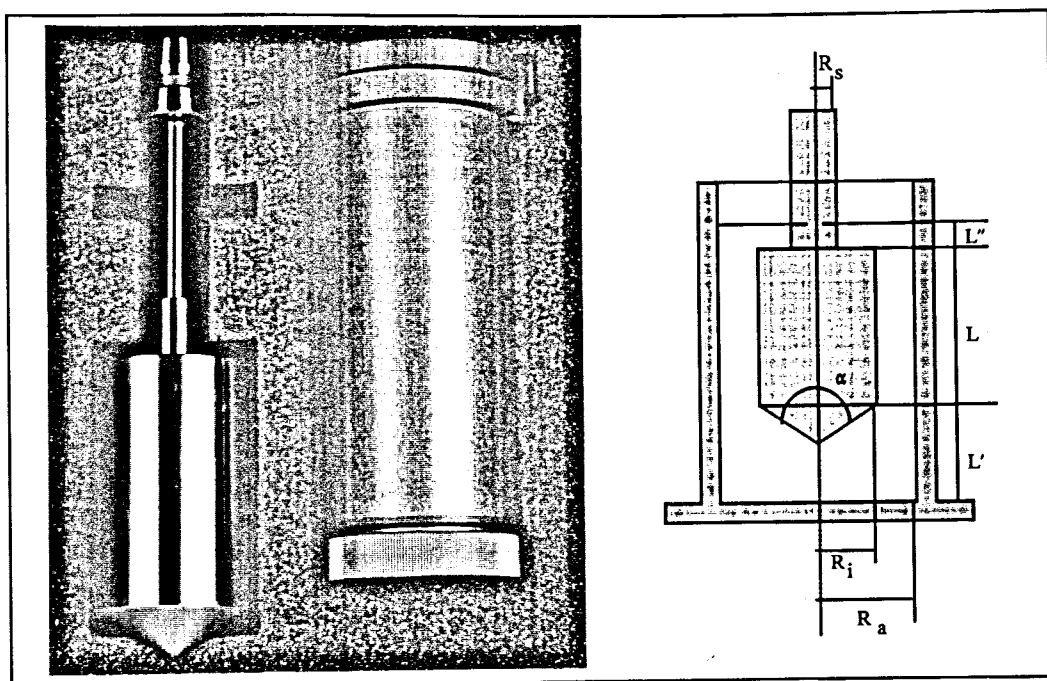


figura 84 – Cilindros concêntricos, modelo MS-Z2 DIN.

PARÂMETRO	VALOR
sistema de medida	Z2 DIN
volume da amostra (cm ³)	100
relação de raios (R_a/R_i)	1,0847
raio do cilindro rotativo, R_i (cm)	2,25
raio do cilindro estático, R_a (cm)	2,44
raio do braço de suporte, R_s (cm)	0,35
ângulo do cone inferior, α (°)	120
comprimento do cilindro rotativo, L (cm)	6,75
distância do vértice inferior do cone à superfície inferior, L' (cm)	3,5
imersão do cilindro rotativo, L'' (cm)	2,25
coeficiente de resistência	1

quadro 7 – Especificações técnicas do modelo MS-Z2 DIN.

Comparando as características técnicas dos dois modelos compreende-se os motivos pelos quais o modelo **MS-Z2 DIN** está melhor adaptado à realização de testes com lamelas. Referem-se, a título exemplificativo, as seguintes:

- o volume de amostra utilizado nos ensaios é **5,88** vezes superior no modelo **MS-Z2DIN**;
- a distância entre as superfícies dos cilindros é de **1,9 mm** no caso do modelo **MS-Z2 DIN** e de **0,5 mm** no caso do modelo **MS-Z1 DIN**, ou seja, **3,8** vezes inferior à do **MS-Z2 DIN**.

6.6.4. Unidade de Aquisição, Tratamento e Registo de Dados

O sistema de aquisição de dados é constituído por um computador da marca **NEC** com **640 Kbytes** de memória **RAM**, dotado de extensão de memória de **3072 Kbytes** e com **100 Mbytes** em disco. Por sua vez, o sistema de registo de dados é constituído por uma impressora **Hewlett Packard** modelo **Deskjet 500**.

O controlo da unidade electrónica **Rheolab MC 100** e o tratamento dos dados obtidos nos ensaios reológicos é realizado com um "software" específico, marca **Rheo-logic RS/120**.

Este "software" apresenta o seguinte "menu" base de utilizações:

- medição;
- impressão;
- simulação.

O programa de medição dispõe de várias opções que permitem executar toda a programação do ensaio pretendida, nomeadamente, o tipo de teste, os parâmetros medidos, o tempo do teste, o perfil da medição pretendida, o modo de impressão dos resultados obtidos, a determinação da curva de regressão que aproxima os valores medidos a um determinado modelo reológico e permite, ainda, dar início ao ensaio e armazenar os elementos obtidos em ficheiro.

A opção de impressão permite preparar e executar a operação de impressão de um determinado ficheiro de resultados.

Na opção de simulação é possível efectuar estudos de regressão matemática que permitem a comparação dos valores obtidos nos ensaios com as curvas que melhor aproximam esses dados segundo as equações dos vários modelos reológicos existentes e obter, ainda, elementos estatísticos relativos ao ajuste efectuado, nomeadamente, o respectivo coeficiente de correlação.

6.6.5. Unidade para Controlo da Temperatura

A unidade para controlo da temperatura da amostra **Viscotherm VT 10** é um aparelho electrónico que realiza o controlo da temperatura da amostra durante a realização de um ensaio reológico.

Esta unidade está dotada de um circuito hidráulico que permite a circulação do fluido térmico entre o reservatório existente no seu interior e o interior do sistema específico para manutenção da temperatura existente em cada geometria e que é adaptado à unidade universal de medida, UM.

Em função da gama de temperaturas pretendida, o fluido térmico utilizado pode ser água desionizada, óleo de silicone ou álcool.

A temperatura existente no fluido térmico é permanentemente exibida num visor digitalizado e, por sua vez, a temperatura da amostra pode ser visualizada na unidade electrónica Rheolab MC 100 ou, em alternativa, visualizada em computador durante a realização do ensaio.

6.7. ENSAIOS GRANULOMÉTRICOS

Os ensaios granulométricos foram realizados num granulómetro laser da marca **Malvern** série 2600.

O princípio de funcionamento do granulómetro laser consiste na detecção da luz difractada pelas partículas sólidas transportadas num meio líquido apropriado (com um índice de refração bastante diferente).

Apresenta-se, esquematicamente, na *figura 85*, a configuração óptica do processo de medição.

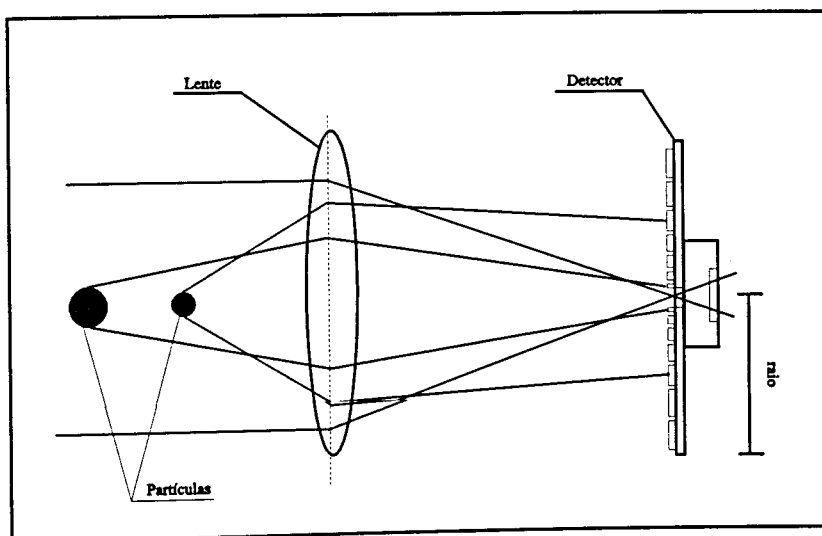


figura 85 – Configuração óptica do processo de medição utilizado nos ensaios granulométricos.

Este processo consiste essencialmente na emissão de um feixe laser de baixa potência que, ao ser interceptado pelas partículas sólidas existentes na sua trajetória rectilínea, é difractado em dois feixes de luz.

Estes feixes incidem, em seguida, numa lente receptora que permite configurar os sinais ópticos recebidos de modo a serem convertidos, por meio de um detector, em sinais eléctricos proporcionais às dimensões das partículas sólidas interceptadas.

A rapidez com que ocorre o processo de medição obriga a efectuar várias medições consecutivas de modo a conseguir obter valores representativos das características de toda a amostra.

Para conseguir efectuar a medição, a amostra de lama é diluída em água e posta a circular num circuito fechado que atravessa, numa determinada secção, o feixe laser anteriormente descrito. O tempo médio de duração da medição é de 5 s.

Apresenta-se, na *figura 86*, uma imagem do local onde foram realizados os ensaios granulométricos.

A dimensão da lente escolhida para realização dos ensaios granulométricos é de 300 mm. Esta lente permite efectuar medições de partículas sólidas com uma gama de diâmetros de 5,8 a 564 μm .

Esta dimensão, a maior disponível, permite abranger a gama de dimensões onde se localizam o maior número das partículas sólidas existentes na lama.

O equipamento utilizado na realização dos ensaios granulométricos é constituído pelos seguintes elementos:

- uma unidade de medição, **Malvern 2600**;
- uma unidade de preparação de amostras, **PS 14 B**;
- uma unidade de aquisição, tratamento e registo de dados.

6.7.1. Unidade de Medição

A unidade de medição óptica é constituída por dois módulos, o transmissor e o receptor, rigidamente ligados a um suporte que garante o alinhamento rigoroso entre estes dois elementos.

O laser está instalado no interior do transmissor onde também se localiza todo o equipamento óptico necessário à formação do feixe de laser.

Por sua vez, no receptor localizam-se as lentes ópticas utilizadas na configuração da luz difractada, o detector onde se realiza a recepção dos feixes e a conversão do sinal óptico num sinal eléctrico proporcional à dimensão das partículas interceptadas e, também, os "interfaces" que permitem a ligação ao computador.

A zona de medição pode ser posicionada em qualquer secção intermédia do aparelho localizada entre o transmissor e o receptor. No entanto, na prática, a distância da zona de medição ao receptor está condicionada pela dimensão da lente utilizada.

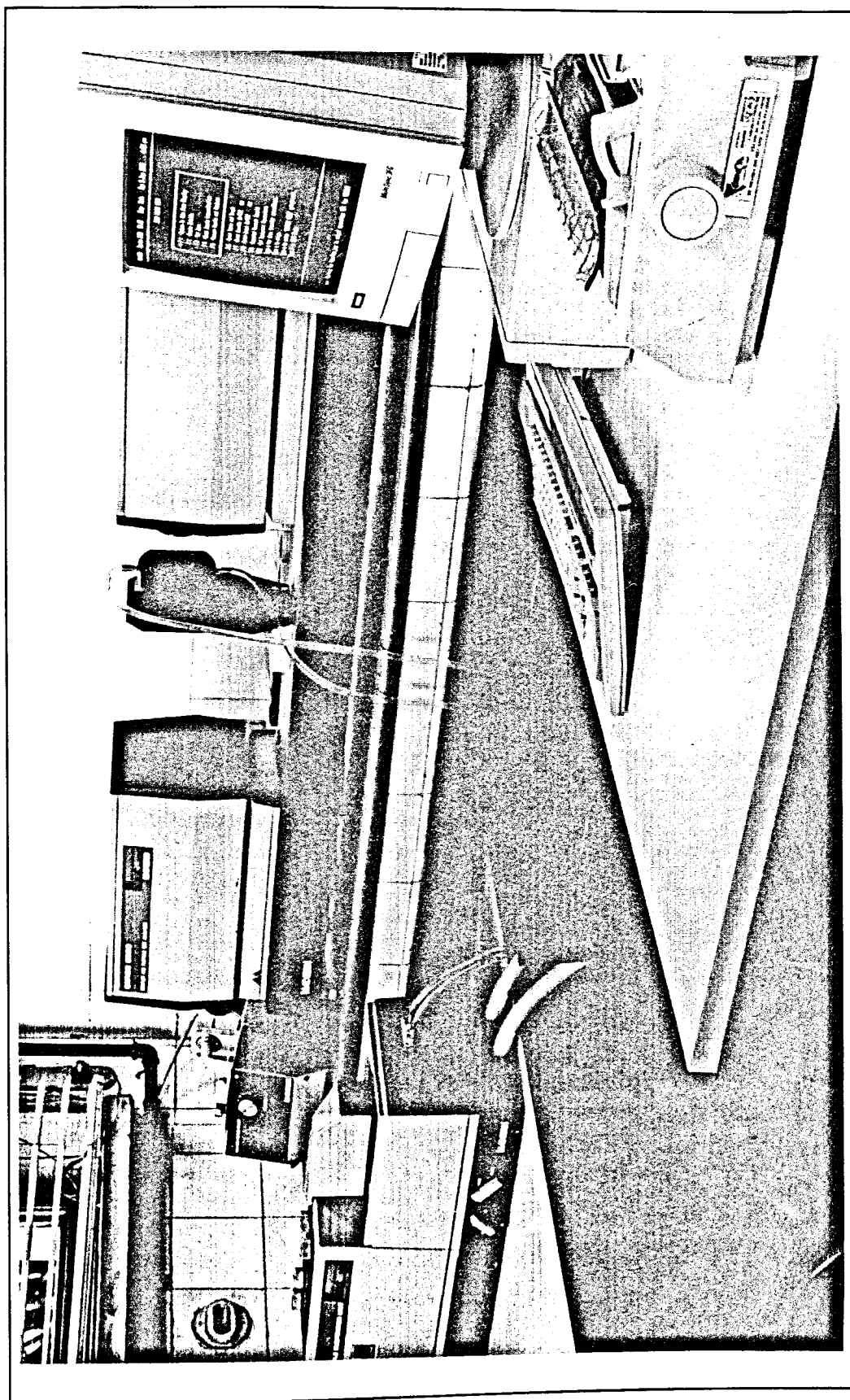


figura 86 – Equipamento de realização dos ensaios granulométricos.

As características técnicas principais desta unidade são as seguintes:

- Transmissor equipado com um laser de Hélio-Néon com 2 mW de potência, comprimento de onda de 633 nm, com 9 mm de expansão do feixe, colimação e filtragem;
- Receptor equipado com lentes de 63, 100 e 300 mm (comprimentos de focagem de, respectivamente, 600, 800 e 1000 mm) e detector composto por 31 elementos de detecção do tipo anular que permitem captar o feixe óptico incidente e convertê-lo num sinal eléctrico proporcional.

6.7.2. Unidade de Preparação de Amostras, PS 14 B

A unidades de preparação de amostras PS 14 B é um acessório do granulómetro laser que permite a realização de ensaios com partículas sólidas que, para o efeito, são previamente colocadas em suspensão num meio aquoso apropriado.

Esta unidade consiste num recipiente dotado de um sistema de agitação e de emissão de ultrasons que está ligado a um circuito hidráulico onde se efectua a circulação, em circuito fechado e com velocidade regulável, do fluido até ao local de medição. Este dispositivo está, ainda, dotado de equipamentos de comando e controlo das condições de funcionamento da unidade.

A preparação da amostra a analisar consiste na sua diluição em água no interior do recipiente, em concentrações compatíveis com as características óptimas de funcionamento do dispositivo de medição. O dispositivo de agitação garante que todas as partículas sólidas existentes são mantidas em suspensão homogénea, independentemente das respectivas densidades, e, por sua vez, a emissão simultânea de ultrasons evita que as partículas se aglomerem.

A circulação deste fluido até à secção de medida é efectuada num circuito hidráulico onde a velocidade do escoamento é ajustada de modo a permitir a obtenção do maior número possível de medições em parcelas distintas da amostra no intervalo de tempo disponível.

6.7.3. Sistema de Aquisição, Tratamento e Registo de Dados

O sistema de aquisição de dados é constituído por um computador Olivetti M250 equipado com um "interface" apropriado para conexão com a unidade de medição Malvern 2600. Este computador dispõe de 1024 Kbytes de memória RAM e 30 Mbytes em disco.

O equipamento inclui um sistema de tratamento de dados contituído por um "software" apropriado para controlo do processo de medição das amostras, e geração de ficheiros de dados, permitindo, ainda, a realização de um adequado tratamento estatístico dos valores medidos. Por último, o equipamento disponível para registo dos dados consiste numa impressora da marca Malvern.

7. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os ensaios experimentais realizados podem ser divididos em duas fases distintas:

- experiências com lamas digeridas;
- experiências durante o processo de digestão das lamas.

Estas duas fases traduzem a evolução que os ensaios experimentais apresentaram e que conduziram a progressivas alterações e correcções nos equipamentos utilizados tendo em vista aumentar a precisão dos valores medidos e ampliar o campo de aplicação do estudo ao maior número possível de casos práticos. Estas fases podem, assim, considerar-se complementares na medida em que os resultados obtidos em cada uma delas permitem, de algum modo, esclarecer algumas dúvidas que a análise individualizada de cada um dos ensaios pode colocar.

Antes de dar início aos estudos experimentais com lamas provenientes de estações de tratamento, realizou-se uma fase preliminar de ensaios com água, destinada a testar as condições de funcionamento das instalações e o rigor dos resultados obtidos.

Apresenta-se, em seguida, uma análise dos resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados.

7.1. ESTUDOS PRELIMINARES COM ÁGUA

As condições de funcionamento da instalação destinada à realização dos estudos hidrodinâmicos foi testada em quatro séries distintas de experiências em que o fluido utilizado foi água. As três primeiras foram realizadas imediatamente após a construção da primeira instalação, enquanto que a quarta e última experiência teve lugar após a realização das alterações à instalação que antecederam os estudos com lamas em digestão anaeróbia.

As três primeiras experiências com água decorreram entre *Novembro de 1993* e *Janeiro de 1994* tendo-se aproveitado estas experiências para testar as condições de operacionalidade dos circuitos hidráulicos de purga, lavagem e ligação das tomadas de pressão ao transdutor diferencial de pressão, o que permitiu a introdução melhoramentos e correcções que vieram a revelar-se extremamente úteis durante as fases seguintes do estudo.

Por sua vez, a segunda série de experiências com água destinou-se a testar as condições de operacionalidade do sistema após as correcções efectuadas e, por isso, englobou, apenas, uma única experiência.

Apresenta-se, no *quadro 8*, um resumo das condições em que se realizaram os estudos hidrodinâmicos com água.

Experiência	Tubagem	Dia do ensaio	Figura n°	Temperatura (°C)	μ (N.s/m ²)
1ª	1"	02/12/93	A.1	7,45	1,409 x 10 ⁻³
	2"	25/11/93	A.2	14,20	1,169 x 10 ⁻³
	2" ^{1/2}	03/12/93	A.3	8,45	1,369 x 10 ⁻³
2ª	1"	13/12/93	A.4	7,90	1,391 x 10 ⁻³
	2"	16/12/93	A.5	7,90	1,391 x 10 ⁻³
	2" ^{1/2}	20/12/93	A.6	8,45	1,369 x 10 ⁻³
3ª	1"	06/01/94	A.7	7,45	1,409 x 10 ⁻³
	2"	04/01/94	A.8	7,90	1,391 x 10 ⁻³
	2" ^{1/2}	10/01/94	A.9	8,45	1,369 x 10 ⁻³
4ª	1"	13/03/95	A.10	31,0	0,789 x 10 ⁻³
	2"	15/03/95	A.11	31,0	0,789 x 10 ⁻³
	2" ^{1/2}	17/03/95	A.12	31,0	0,789 x 10 ⁻³

quadro 8 – Elementos sobre os estudos hidrodinâmicos com água.

Por sua vez, apresentam-se, nas **figuras A.1 a A.12** do **Anexo A**, num sistema de eixos coordenados (velocidade; perda de carga unitária), os resultados obtidos nas experiências realizadas com água.

Nestas **figuras** inclui-se, também, a recta que traduz o escoamento em regime turbulento em tubos lisos, obtida pela aplicação da fórmula de *Colebrooke-White* considerando $k_s=0$, (equação (269)) e, em seguida, pela aplicação do valor obtido para o coeficiente de perda de carga na equação (120), fórmula de *Darcy-Weisbach*, para cálculo do correspondente valor da perda de carga unitária. Em alguns casos, quando a sua representação é possível dentro dos limites impostos para os eixos coordenados, apresenta-se, ainda, a recta que traduz o comportamento da água em regime laminar.

Apresentam-se, no **quadro 9**, alguns elementos estatísticos referentes aos ensaios realizados.

Tubagem	Experiência	Número de medições	Desvio Padrão (na determinação da perda de carga)			Erro médio (% do valor medido)
			valor máximo	valor mínimo	valor médio	
1"	1ª	34	0,877	0,073	0,424	0,47
	2ª	21	2,099	0,016	0,542	0,45
	3ª	34	1,224	0,073	0,440	0,47
	4ª	42	1,583	0,062	0,218	0,34
2"	1ª	137	0,158	0,095	0,116	3,84
	2ª	37	0,122	0,088	0,106	4,04
	3ª	37	0,122	0,088	0,106	4,04
	4ª	40	0,090	0,068	0,080	4,73
2" ^{1/2}	1ª	47	0,103	0,076	0,088	14,50
	2ª	48	0,103	0,076	0,088	14,24
	3ª	48	0,103	0,076	0,088	14,24
	4ª	47	0,095	0,071	0,078	19,73

quadro 9 – Elementos estatísticos referentes aos ensaios realizados com água.

Na **figura 87** apresentam-se os resultados obtidos durante esta fase preliminar, num sistema de eixos adimensional (Re , λ).

7.1.1. Análise dos Resultados Obtidos

Os resultados obtidos nos estudos preliminares permitiram concluir que a instalação construída realiza com adequada precisão estudos hidrodinâmicos de quantificação de perdas de carga em escoamentos em condutas sob pressão.



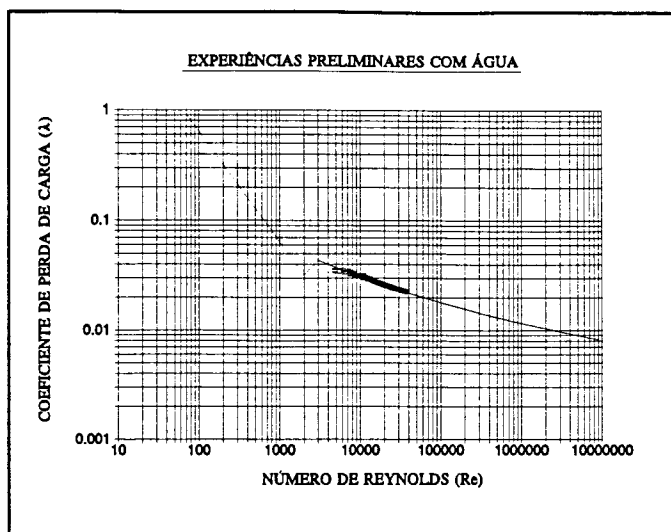


figura 87 – Resultados obtidos nos estudos preliminares com água num sistema de eixos adimensional.

Foi, além disso, possível verificar que as tubagens de PVC utilizadas podem ser consideradas como tubos lisos, pois a aplicação da fórmula de *Colebrooke-White*, considerando nulo o valor da rugosidade relativa, constitui uma boa aproximação aos valores obtidos experimentalmente.

Verificou-se, além disso, que o sistema idealizado para efectuar a ligação entre as tomadas de pressão e o transdutor diferencial de pressão constitui uma boa solução para a purga e limpeza das tubagens de ligação e não interfere com o rigor das medições efectuadas.

Por último, verificou-se que, durante as medições, a aquisição de dados processou-se, sempre, com uma elevada estabilidade avaliada tanto em termos de caudal como de pressão diferencial medidos.

Nos ficheiros onde se registaram os resultados obtidos nas experiências, optou-se por registar, apenas, o valor do desvio padrão referente às medições da pressão diferencial. Com efeito, verificou-se que os valores medidos para o caudal apresentavam sempre uma grande estabilidade ao longo das leituras, pelo que as perturbações nas medições de pressão assumiam uma importância acrescida na verificação das condições em que se processou a aquisição de dados.

Durante estas experiências verificou-se que, em geral, os valores obtidos para o erro médio das séries de registos de pressões diferenciais, situavam-se nas seguintes gamas:

- na tubagem de 1", < 1,0% do valor médio;
- na tubagem de 2", 3,0 a 5,0% do valor médio;
- na tubagem de 2^{1/2}", 14,0 a 20,0% do valor médio.

O elevado valor percentual do erro médio existente nas medições efectuadas na tubagem de 2^{1/2}" justifica-se, uma vez que a pressão diferencial medida na instalação para esta tubagem é, nos ensaios com água, muito diminuta. Consequentemente, como os valores do desvio padrão se mantiveram sensivelmente

constantes ao longo de toda a gama de leituras nesta conduta, para os caudais mínimos escoados, correspondentes às mínimas pressões diferenciais medidas, a relação do desvio padrão com o valor médio medido atingiu valores mais significativos.

Verifica-se, assim, que embora a gama total de velocidades abrangida na tubagem de 2"^{1/2} seja de 0,084 a 0,314 m/s, o desvio padrão ultrapassa um valor de 10%, em relação ao valor médio medido, para velocidades na conduta inferiores a 0,18 m/s.

Dois factores poderão contribuir para a ocorrência deste facto:

- 1º) a imprecisão relativa nos valores medidos poderá estar associada à própria capacidade de resolução do sistema de aquisição de dados existente para pressões diferenciais muito baixas (1 a 2 mm);
- 2º) o grupo electro-bomba poderá introduzir uma ligeira vibração no escoamento. Este fenómeno, embora possa ocorrer para toda a gama de caudais é, apenas, perceptível nas medições a baixos caudais e muito baixas pressões diferenciais.

Analisando os valores obtidos e considerando, em particular, a relativa constância dos valores do desvio padrão ao longo de toda a série de experiências, é possível afirmar que o segundo factor deverá ter um peso mais significativo.

No entanto, convém referir que estas medições confirmaram que a vibração introduzida no escoamento pelo grupo electro-bomba tem um valor absoluto residual e não perturba significativamente os valores medidos, facto ao qual não se atribui uma particular relevância porque:

- 1º) As pressões diferenciais medidas nos ensaios com água são muito inferiores às medidas nos ensaios com lamas concluindo-se, assim, que nessas experiências este aspecto não será tão relevante;
- 2º) Durante os ensaios com lamas a própria heterogeneidade do fluido e a existência de biogás no escoamento são factores que poderão introduzir perturbações nos valores medidos de dimensão superior a esta.

7.2. EXPERIÊNCIAS COM LAMAS DIGERIDAS

A primeira fase propriamente dita de testes experimentais com lamas, decorreu entre *Fevereiro e Junho* de 1994. Nesta fase das experiências realizaram-se dois testes a lamas digeridas da *ETAR de Parada na Maia*, com uma duração aproximada de 1,5 meses por teste.

As lamas digeridas foram recolhidas num dos digestores secundários de lamas existentes na ETAR, a uma profundidade de cerca de 2,5 m.

Nesta primeira parte do estudo realizaram-se os seguintes testes com as lamas:

- Determinação dos sólidos totais e voláteis;
- Determinação da temperatura das lamas;
- Estudos hidrodinâmicos;
- Estudos granulométricos.

Esta parte permitiu, assim, em primeiro lugar, ajustar a instalação construída ao estudo hidrodinâmico do escoamento das lamas e, sobretudo, obter um elevado número de informação sobre o comportamento hidrodinâmico e granulométrico exibido pelas lamas digeridas e, ainda, sobre a evolução no tempo dos valores medidos.

7.2.1. Primeira Série de Experiências com Lamas Digeridas

A recolha das lamas digeridas na *ETAR de Parada na Maia* ocorreu no dia 08/02/94.

Durante a primeira série de experiências com lamas digeridas realizaram-se, apenas, três experiências.

O reduzido número de experiências realizadas num intervalo de tempo de 1,5 meses justifica-se, fundamentalmente, pela necessidade de adaptação à instalação e pelas particularidades decorrentes do facto de se operar com uma instalação onde circulam lamas.

Durante esta série de experiências realizaram-se três análises laboratoriais para determinar a concentração de sólidos totais e sólidos voláteis existentes nas lamas.

Apresenta-se, no *quadro 10*, os resultados obtidos nas análises para determinação da concentração de sólidos.

Experiência	Data	ST		SV	
		(mg/ℓ)	(%)	(mg/ℓ)	(% ST)
1ª	09/02/94	14 158	1,42	9 932	70,15
2ª	20/02/94	14 109	1,41	9 948	70,51
3ª	08/03/94	13 805	1,38	9 690	70,20

quadro 10 – Resultados obtidos nas análises efectuadas para determinação da concentração em sólidos na 1ª série de experiências com lamas digeridas.

Por sua vez, apresenta-se no *quadro 11*, um resumo das condições em que se realizaram os estudos hidrodinâmicos durante a primeira série de experiências com lamas digeridas.

Na última coluna do *quadro 11* apresenta-se o valor do coeficiente de viscosidade dinâmico da água à temperatura existente na lama durante o ensaio.

Experiência	Tubagem	Dia do ensaio	Figura nº	Temperatura (°C)	$\mu_{\text{água}}$ (N.s/m ²)
1ª	1"	10/02/94	A.13	10,00	$1,310 \times 10^{-3}$
	2"	21/02/94	A.14	13,80	$1,181 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	16/02/94	A.15	9,10	$1,343 \times 10^{-3}$
2ª	1"	27/02/94	A.16	13,20	$1,200 \times 10^{-3}$
	2"	24/02/94	A.17	13,80	$1,181 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	20/02/94	A.18	13,40	$1,194 \times 10^{-3}$
3ª	1"	08/03/94	A.19	12,50	$1,223 \times 10^{-3}$
	2"	11/03/94	A.20	14,30	$1,166 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	07/03/94	A.21	13,20	$1,200 \times 10^{-3}$

quadro 11 – Elementos sobre os estudos hidrodinâmicos realizados na 1ª série de experiências com lamas digeridas.

Apresentam-se, nas *figuras A.13 a A.21* do Anexo A, os resultados obtidos nos estudos hidrodinâmicos num sistema de eixos coordenados (velocidade; perda de carga unitária).

Nessas *figuras* apresenta-se, ainda, a recta que traduz, nesse sistema de eixos coordenados, o escoamento em regime turbulento liso da água à temperatura a que se realizou o ensaio e, em alguns casos, inclui-se, também, a recta referente ao regime laminar.

Apresentam-se no *quadro 12* alguns elementos estatísticos referentes aos ensaios realizados.

De referir que, durante esta primeira série de experiências com lamas digeridas, realizou-se, apenas, uma análise granulométrica às lamas.

A análise granulométrica realizou-se já na parte final das experiências, no dia 11/03/94, apresentando-se os resultados obtidos nas *figuras C.1 e C.2* do Anexo C. Por sua vez, na *figura C.3* do Anexo C, apresenta-se a curva granulométrica da lama.

Tubagem	Experiência	Número de medições	Desvio Padrão (na determinação da perda de carga)			Erro médio (% do valor medido)
			valor máximo	valor mínimo	valor médio	
1"	1ª	77	6,070	0,446	1,846	2,54
	2ª	73	4,519	0,401	1,640	2,16
	3ª	107	—	—	—	—
2"	1ª	133	1,224	0,069	0,270	4,41
	2ª	143	1,224	0,069	0,276	4,28
	3ª	139	—	—	—	—
2" ^{1/2}	1ª	104	3,280	0,027	0,100	2,89
	2ª	105	2,560	0,060	0,207	7,40
	3ª	84	2,370	0,057	0,085	3,71

quadro 12 – Elementos estatísticos referentes aos estudos hidrodinâmicos realizados durante a 1ª série de experiências com lamas digeridas.

Conclui-se, assim, que a lama digerida tem um diâmetro médio de cerca de 31,30 μm e verifica-se que uma percentagem significativa das partículas (7,5%) apresenta um diâmetro médio no intervalo inferior de medida, isto é, entre 1,5 e 5,8 μm . Não foi, no entanto, possível durante esta série de experiências acompanhar a evolução da curva granulométrica ao longo do período de realização dos ensaios.

7.2.1.1. Análise dos Resultados Obtidos

Analisando os resultados obtidos nas análises à concentração de sólidos é possível concluir que as lamas apresentam uma concentração de sólidos bastante baixa que se deve, em princípio, à profundidade a que estas lamas foram recolhidas no digestor secundário.

Com efeito, devido ao espessamento gravítico das lamas que ocorre no digestor secundário, existe um gradiente de concentrações de lamas no seu interior, estando as máximas concentrações na zona inferior do tanque.

No entanto, com o equipamento existente, não foi possível realizar recolha de lamas digeridas a maiores profundidades nem, tão pouco, no circuito hidráulico de ligação ao equipamento de desidratação mecânica.

Por outro lado, verificou-se, também, que a concentração de sólidos voláteis é elevada quando comparada com os valores propostos na bibliografia para lamas digeridas. Por seu lado, o teor em sólidos totais e voláteis não sofreu uma alteração significativa durante o período em que decorreram as experiências. Este facto poderá significar que a matéria orgânica existente é composta por substâncias complexas cuja biodegradação se processa a um ritmo muito lento agravado, ainda, pelas condições de temperatura ocorridas que variaram entre os 9,1 e os 14,3°C.

Embora a concentração de sólidos nas lamas seja bastante baixa, da ordem de 1,4%, os estudos hidrodinâmicos efectuados revelam que esta lama apresenta já um nítido comportamento reológico não-Newtoniano.

Com efeito, embora não tenha sido possível, nesta fase, realizar estudos reológicos às lamas, a análise aos estudos hidrodinâmicos permite, por comparação com o comportamento previsível para a água à mesma temperatura, concluir que, em regime laminar, as perdas de carga das lamas assumem uma acentuada estabilidade sendo muito superiores, em valor, às apresentadas pela água nas mesmas condições.

Por sua vez, a velocidade do escoamento na transição do regime laminar para turbulento é consideravelmente superior à verificada no caso da água e, por último, em regime turbulento as perdas de carga são superiores às previstas para a água.

Todos estes aspectos permitiram concluir que as lamas apresentam um comportamento reológico do tipo não-Newtoniano e, embora não tenha sido possível definir com rigor o comportamento reológico das lamas, procurou-se, por iterações sucessivas, definir qual o comportamento reológico mais provável exibido pelas lamas nos estudos hidrodinâmicos. Então, aplicando a equação (114) em regime laminar e, em regime turbulento, a equação de Dodge e Metzner (equação (208)), obtiveram-se as curvas que definem em regime laminar e turbulento o escoamento de fluidos com comportamento reológico do tipo *Herschell-Bulkley*.

Apresenta-se, nas *figuras 88, 89 e 90*, o resultado da aplicação desta metodologia aos resultados obtidos nos estudos hidrodinâmicos, num sistema de eixos adimensional (Re_λ, λ).

Conclui-se, assim, que os parâmetros reológicos da lama analisada são, em princípio, os seguintes:

- *tensão de cedência*; $0,250 \leq \tau \leq 0,300 \text{ N/m}^2$
- *coeficiente de consistência*; $K = 0,0018 \text{ N.s}^n/\text{m}^2$
- *índice de potência*; $n = 1,16$

Refere-se, ainda, que se verificou uma grande estabilidade nas medições efectuadas sendo os resultados obtidos para o *coeficiente de consistência* e para o *índice de potência* constantes em todas as experiências ao passo que o valor da *tensão de cedência* foi baixando gradualmente ao longo do tempo, de cerca de 0,300 N/m² para 0,270 N/m² e, finalmente, 0,250 N/m², respectivamente, na primeira, segunda e terceira experiência.

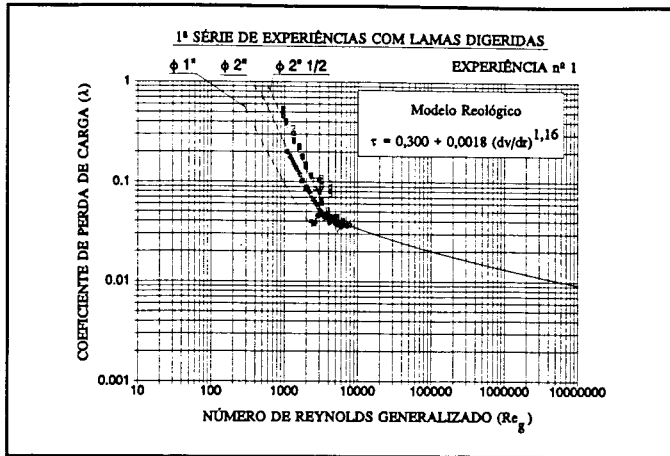


figura 88 – Aplicação da equação reológica mais provável aos resultados obtidos na 1ª experiência realizada na 1ª série de experiências com lamas digeridas.

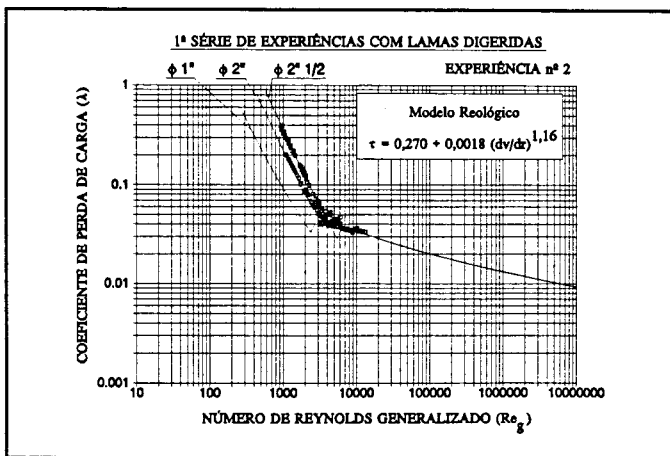


figura 89 – Aplicação da equação reológica mais provável aos resultados obtidos na 2ª experiência realizada na 1ª série de experiências com lamas digeridas.

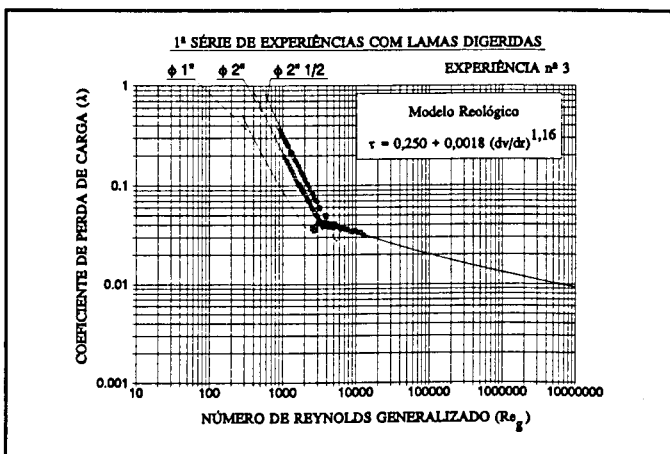


figura 90 – Aplicação da equação reológica mais provável aos resultados obtidos na 3ª experiência realizada na 1ª série de experiências com lamas digeridas.

Atendendo à reduzida variação ocorrida na concentração de sólidos totais e de sólidos voláteis ao longo do período em que decorreram as experiências, poderá colocar-se a hipótese de a gradual redução no valor da *tensão de cedência* estar relacionada com a passagem sucessiva da lama pelo circuito onde se realizaram os testes hidrodinâmicos e, em particular, pelo grupo electro-bomba.

No final desta primeira série de experiências com lamas digeridas é, então, possível retirar as seguintes conclusões:

- As lamas digeridas mantiveram-se razoavelmente estáveis durante o período em que foram analisadas, não tendo sido notadas alterações significativas na concentração de sólidos totais e voláteis, nem durante os estudos hidrodinâmicos. Este facto revela que, embora o teor em matéria orgânica seja bastante elevado para uma lama já digerida, esta matéria orgânica não é facilmente biodegradável.
- Os estudos hidrodinâmicos efectuados revelam que a lama apresenta um acentuado carácter não-Newtoniano podendo o seu comportamento reológico ser bem definido a partir do modelo de *Herschell-Bulkley*. Contudo, o índice de potência existente no modelo de *Herschell-Bulkley* é bastante próximo da unidade não sendo de excluir, nesta fase, a existência de um comportamento reológico do tipo plástico de *Bingham*.
- A *tensão de cedência* provável para a lama é relativamente reduzida, da ordem de 0,250 a 0,300 N/m², o que significa que o número de *Hedstrom* do escoamento será, também, bastante baixo e, consequentemente, a transição do regime laminar para o turbulento não se afasta muito da zona correspondente à gama de números de *Reynolds* generalizados situada entre 2100 e 3000. Com efeito, apenas na tubagem de 2^{1/2} o número de *Hedstrom* assume valores um pouco superiores a 10⁴, atingindo-se, neste caso, a transição para valores de $Re_g=4500$.
- Os valores obtidos em regime turbulento, abrangem uma gama relativamente reduzida de números de *Reynolds* (3000 a 12000). É possível verificar, no entanto, que a fórmula de *Dodge e Metzner* permite um ajuste bastante razoável aos resultados obtidos. Verifica-se, assim, que, como seria de esperar, em regime turbulento a *tensão de cedência* deixa de ser um parâmetro influenciador do escoamento.
- É possível, também, constatar que a percentagem do erro médio das medições nos estudos hidrodinâmicos, em percentagem do valor da perda de carga medida, baixou consideravelmente na tubagem de 2^{1/2}, quando comparado com os valores obtidos nos ensaios preliminares com água. Este facto é devido ao aumento dos valores medidos para a perda de carga e confirma, assim, que o erro médio das medições, embora bastante reduzido, se deve atribuir a uma pequena vibração no escoamento produzida pelo grupo electro-bomba.
- Embora só se tenha realizado uma experiência para determinação da curva granulométrica da lama já na fase final dos ensaios, os resultados obtidos revelam a existência de uma distribuição de frequências muito parecida com uma lei do tipo normal. É, no entanto, de realçar a existência de uma parcela significativa de sólidos na gama dos mais pequenos diâmetros ($\phi \approx 3,5 \mu m$) que poderá ser

resultante das passagens sucessivas das lamas pela "mohno"-bomba e da consequente fracturação e desgaste ocorridos nas partículas.

7.2.2. Segunda Série de Experiências com Lamas Digeridas

No final da primeira série de experiências com lamas digeridas, verificou-se que haveria toda a vantagem em executar uma segunda série de experiências com lamas digeridas nas mesmas condições para confirmar os seguintes aspectos:

- avaliar em que medida os resultados obtidos podem ser dependentes da lama analisada.
- melhorar as condições de medição existentes. Isto é, efectuar mais medições nos estudos hidrodinâmicos (uma por semana) e acompanhar a evolução das características granulométricas ao longo de toda a série de experiências.

A recolha de lamas digeridas na *ETAR de Parada na Maia* ocorreu no dia 28/03/94.

Durante esta série de experiências realizaram-se três análises laboratoriais para determinar a concentração de sólidos totais e sólidos voláteis existentes nas lamas.

Apresenta-se, no **quadro 13**, os resultados obtidos nas análises para determinação da concentração em sólidos.

Experiência	Data	ST		SV	
		(mg/l)	(%)	(mg/l)	(% ST)
1ª	29/03/94	12 984	1,30	9 078	69,9
2ª	28/04/94	12 521	1,25	8 683	69,3
3ª	14/05/94	12 126	1,21	8 384	69,1

quadro 13 – Resultados obtidos nas análises para determinação da concentração em sólidos na 2ª série de experiências com lamas digeridas.

Em relação aos estudos hidrodinâmicos, seguindo uma metodologia idêntica à adoptada em 7.2.1., apresentam-se, no **quadro 14**, as condições em que estes foram realizados e nas **figuras A.22 a A.39** do Anexo A, os resultados obtidos num sistema de eixos coordenados (velocidade; perda de carga unitária).

Experiência	Tubagem	Dia do ensaio	Figura n°	Temperatura (°C)	$\mu_{\text{água}}$ (N.s/m ²)
1ª	1"	28/03/94	A.22	15,70	$1,124 \times 10^{-3}$
	2"	30/03/94	A.23	12,00	$1,239 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	01/04/94	A.24	14,50	$1,160 \times 10^{-3}$
2ª	1"	06/04/94	A.25	15,10	$1,142 \times 10^{-3}$
	2"	07/04/94	A.26	16,50	$1,101 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	09/04/94	A.27	15,00	$1,145 \times 10^{-3}$
3ª	1"	11/04/94	A.28	13,50	$1,190 \times 10^{-3}$
	2"	13/04/94	A.29	13,50	$1,190 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	16/04/94	A.30	18,80	$1,040 \times 10^{-3}$
4ª	1"	25/04/94	A.31	15,10	$1,142 \times 10^{-3}$
	2"	28/04/94	A.32	15,10	$1,142 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	29/04/94	A.33	19,00	$1,035 \times 10^{-3}$
5ª	1"	02/05/94	A.34	15,70	$1,124 \times 10^{-3}$
	2"	04/05/94	A.35	17,00	$1,088 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	10/05/94	A.36	20,00	$1,010 \times 10^{-3}$
6ª	1"	14/05/94	A.37	—	—
	2"	18/05/94	A.38	14,00	$1,175 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	19/05/94	A.39	15,70	$1,124 \times 10^{-3}$

quadro 14 – Elementos sobre os estudos hidrodinâmicos realizados na 2ª série de experiências com lamas digeridas.

Por sua vez, apresentam-se, no **quadro 15**, alguns elementos estatísticos referentes aos ensaios realizados.

Tubagem	Experiência	Número de medições	Desvio Padrão (na determinação da perda de carga)			Erro médio (% do valor medido)
			valor máximo	valor mínimo	valor médio	
1"	1ª	137	12,304	0,406	1,782	1,61
	2ª	106	6,070	0,440	1,751	2,87
	3ª	187	14,561	0,419	1,884	1,70
	4ª	205	8,089	0,128	1,486	1,38
	5ª	185	6,991	0,206	1,292	1,26
2"	1ª	156	0,809	0,103	0,249	4,11
	2ª	65	0,546	0,095	0,215	4,76
	3ª	171	0,479	0,095	0,194	3,61
	4ª	201	0,458	0,091	0,184	3,67
	5ª	106	0,685	0,073	0,173	3,83
	6ª	132	0,875	0,074	0,154	3,21
2" ^{1/2}	1ª	91	0,544	0,072	0,111	3,35
	2ª	124	0,520	0,065	0,115	4,47
	3ª	84	0,201	0,071	0,099	3,78
	4ª	176	0,627	0,066	0,109	4,09
	5ª	144	0,396	0,062	0,112	4,25
	6ª	170	1,164	0,062	0,111	3,61

quadro 15 – Elementos estatísticos referentes aos estudos hidrodinâmicos realizados na 2ª série de experiências com lamas digeridas.

Por último, durante a segunda série de experiências com lamas digeridas realizaram-se, ainda, os estudos granulométricos às lamas apresentados no *quadro 16* e nas *figuras C.4 a C.18* do Anexo C.

Os elementos apresentados no *quadro 16* incluem dois parâmetros adimensionais que permitem classificar os sólidos existentes na lama em função da maior ou menor amplitude atingida pelos diâmetros das partículas.

Estes parâmetros são o coeficiente de uniformidade (C_u) e o coeficiente de curvatura (C_c) cujas equações são as seguintes:

$$C_u = \frac{\phi_{60}}{\phi_{10}} \quad (279)$$

$$C_c = \frac{\phi_{30}^2}{\phi_{10} \times \phi_{60}} \quad (280)$$

Dia do ensaio	Experiência	Figura nº	Diâmetro médio (μm)	C_u	C_c
28/03/94	1.1	C.4	46,63	4,7	1,21
	1.2	C.5	47,52		
06/04/94	2.1	C.7	40,14	5,8	1,34
	2.2	C.8	41,02		
13/04/94	3.1	C.10	38,00	5,3	1,11
	3.2	C.11	38,58		
28/04/94	4.1	C.13	34,44	6,1	1,22
	4.2	C.14	34,11		
19/05/94	5.1	C.16	30,41	5,7	1,29
	5.2	C.17	30,01		

quadro 16 – Resultados obtidos nos estudos granulométricos realizados na 2ª série de experiências com lamas digeridas.

7.2.2.1. Análise dos Resultados Obtidos

Os resultados obtidos nas análises à concentração em sólidos são semelhantes aos valores obtidos durante a primeira série de experiências, isto é, as lamas apresentam uma concentração em sólidos bastante baixa (mesmo ligeiramente mais baixa do que na primeira série).

Verifica-se, também, que a concentração de sólidos voláteis é bastante elevada e idêntica, quando considerada em percentagem dos sólidos totais, aos resultados obtidos na primeira série de experiências.

Verifica-se, ainda, que o teor em sólidos totais e voláteis não sofreu uma alteração significativa durante o período em que decorreram as experiências o que confirma que a matéria orgânica existente é composta por substâncias complexas e cuja biodegradação se processa a um ritmo muito lento, embora nesta série de experiências a temperatura das lamas tenha sido superior à anterior, situando-se entre os 12,0 e os 20,0°C.

Os estudos hidrodinâmicos efectuados apresentam, também, valores notavelmente semelhantes aos exibidos na primeira série de experiências com lama digerida.

Confirma-se, assim, que a lama apresenta um marcado comportamento reológico não-Newtoniano ocorrendo, também, pequenas variações nos valores das perdas de carga em regime laminar. Por sua vez, a passagem de regime laminar para turbulento ocorre para valores da velocidade muito superiores aos verificados com água e, em regime turbulento, as perdas de carga são, também, bastante superiores às da água.

Não se dispondo, ainda, nesta fase, de equipamento adequado para realização dos estudos reológicos às lamas optou-se por aplicar a metodologia seguida em 7.2.1. para definir as características reológicas que definem o comportamento do fluido.

Apresenta-se, nas *figuras 91 a 96*, o resultado da aplicação desta metodologia aos resultados obtidos nos estudos hidrodinâmicos, num sistema de eixos adimensional (Re, λ).

Verifica-se, assim, que, nestas lamas, o comportamento reológico mais provável é praticamente idêntico ao apresentado pelas lamas estudadas na primeira série de experiências com lamas digeridas.

Conclui-se, assim, com base nos resultados obtidos nos estudos hidrodinâmicos realizados com lamas digeridas, que os valores mais prováveis para os *coeficiente de consistência* e *índice de potência* são de, respectivamente, 0,0018 N.s^m/m² e 1,16.

Por sua vez, a *tensão de cedência* apresenta uma variação regular ao longo das experiências convergindo para um valor mínimo da ordem dos 0,250 N/m² na primeira série de experiências e de 0,240 N/m² na segunda série.

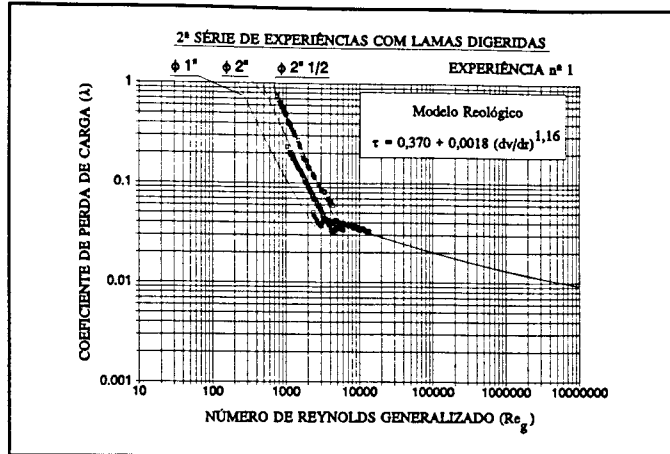


figura 91 – Aplicação da equação reológica mais provável aos resultados obtidos na 1ª experiência realizada na 2ª série de experiências com lammas digeridas.

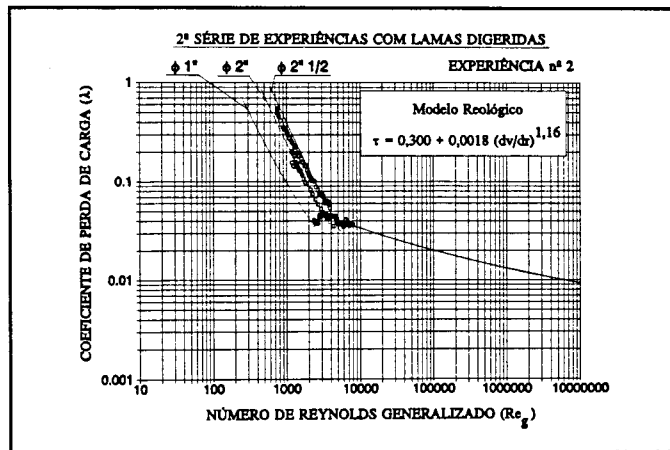


figura 92 – Aplicação da equação reológica mais provável aos resultados obtidos na 2ª experiência realizada na 2ª série de experiências com lammas digeridas.

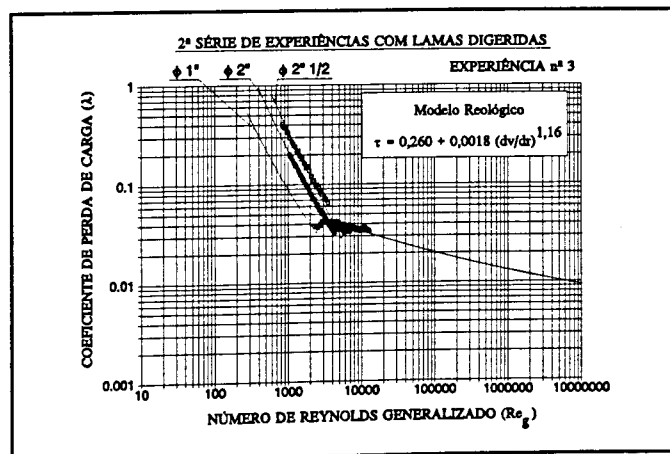


figura 93 – Aplicação da equação reológica mais provável aos resultados obtidos na 3ª experiência realizada na 2ª série de experiências com lammas digeridas.

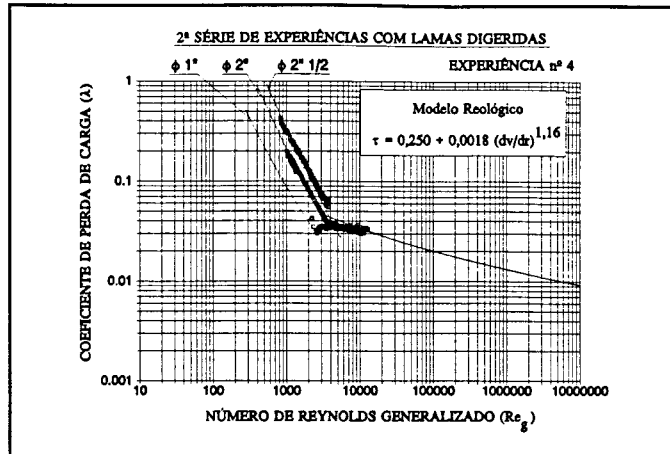


figura 94 – Aplicação da equação reológica mais provável aos resultados obtidos na 4ª experiência realizada na 2ª série de experiências com lamas digeridas.

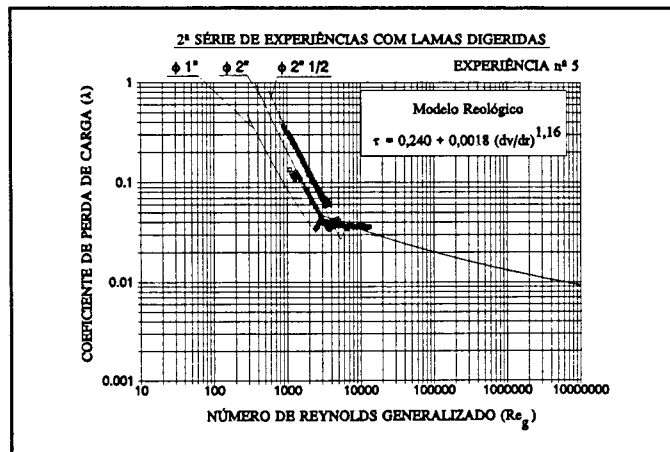


figura 95 – Aplicação da equação reológica mais provável aos resultados obtidos na 5ª experiência realizada na 2ª série de experiências com lamas digeridas.

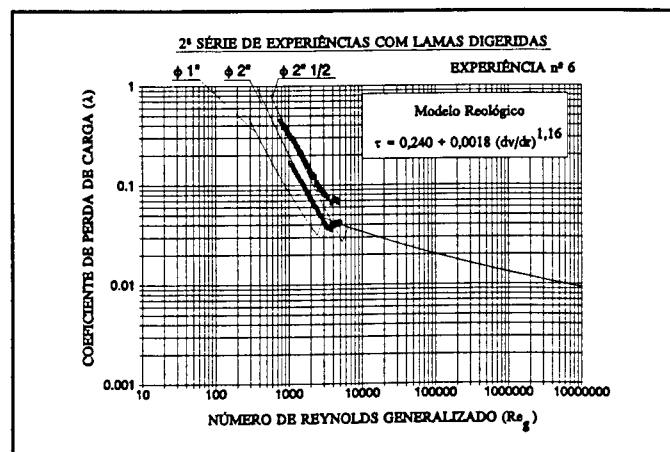


figura 96 – Aplicação da equação reológica mais provável aos resultados obtidos na 6ª experiência realizada na 2ª série de experiências com lamas digeridas.

Admitindo que o dia teórico de uma experiência coincide com o número de dias decorrido desde a colheita da amostra até ao valor médio dos dias em que esta se realizou nas diferentes condutas, apresenta-se, na **figura 97**, a evolução do valor da *tensão de cedência* ao longo das duas séries de experiências com lamas digeridas.

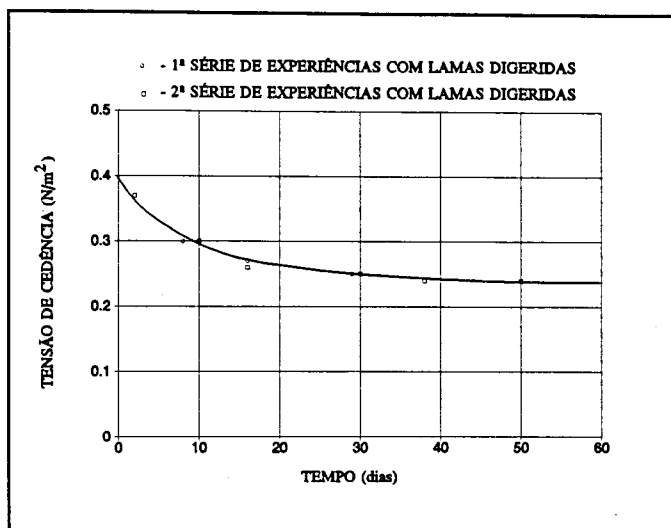


figura 97 - Evolução provável da *tensão de cedência* durante as duas séries de experiências com lamas digeridas.

Admitindo um comportamento reológico médio da lama definido pela equação:

$$\tau = 0,300 + 0,0018 \left(\frac{dv}{dr} \right)^{1,16} \quad (281)$$

apresenta-se, na **figura 98**, para o regime turbulento, a relação entre o número de *Reynolds* generalizado e o coeficiente de proporcionalidade que traduz a cociente entre os coeficientes de perda de carga para fluidos com um comportamento reológico desse tipo e fluidos *Newtonianos*.

Por último, os resultados obtidos nos estudos granulométricos confirmam que existe uma alteração significativa na granulometria das partículas sólidas ao longo do período em que decorreram as experiências. Essa alteração consiste, principalmente, no aumento acentuado do número de partículas de mais pequena dimensão ($\phi \approx 3,5 \mu m$) e deve, em princípio, estar associada à fracturação e desgaste de origem mecânica que ocorre devido à passagem frequente das lamas pela "mohno" bomba.

Apresenta-se, na **figura 99**, a evolução do diâmetro médio das partículas sólidas durante esta série de experiências.

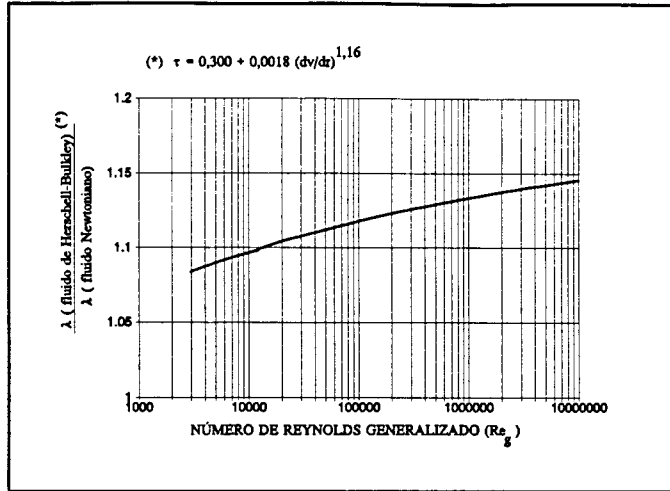


figura 98 – Relação entre os coeficientes de perda de carga das lamelas digeridas e de um fluido Newtoniano.

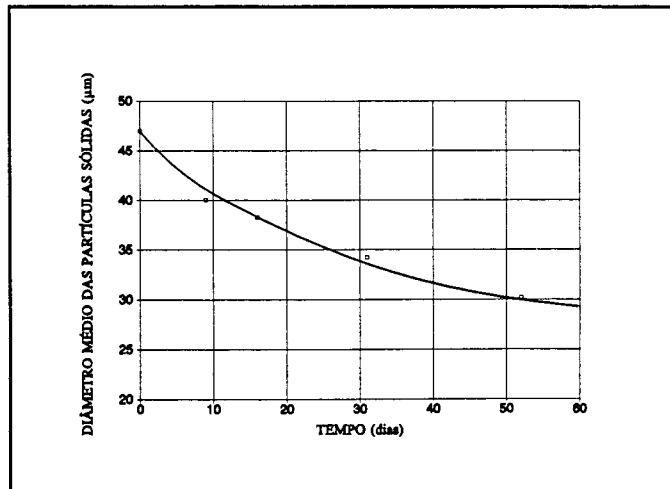


figura 99 – Evolução do diâmetro médio das partículas sólidas na 2ª série de experiências com lamelas digeridas.

Verifica-se, assim, que o diâmetro médio das partículas sólidas sofreu uma redução global de cerca de 36% o que pode considerar-se bastante significativo.

Seguindo a classificação adoptada em mecânica dos solos para solos finos, que consiste na consideração de um solo bem graduado quando $C_u > 6,0$ e $1 < C_c < 3$, pode-se concluir que as partículas sólidas existentes na lama digerida são mal graduadas, isto é, são uniformes. Deve-se, contudo, referir que, na experiência nº4, embora o valor obtido para o coeficiente de uniformidade esteja no limiar inferior da classificação de um material sólido bem graduado, este material deve continuar a classificar-se como mal graduado.

No entanto, analisando a evolução dos coeficientes de uniformidade e de curvatura conclui-se que, embora ocorram ligeiras modificações aos seus valores ao longo desta série de experiências, essas alterações

não assumem uma particular relevância. Poderá, assim, concluir-se que o aumento da percentagem de partículas de pequenas dimensões é realizada com a contribuição mais ou menos uniforme de todas as restantes partículas mantendo-se, por isso, a respectiva curva granulométrica com uma configuração semelhante, embora com uma progressiva translação no sentido dos pequenos diâmetros.

No final desta segunda série de experiências com lamas digeridas é possível retirar as seguintes conclusões dos estudos até agora efectuados:

- Confirma-se que as lamas digeridas são fluidos estáveis não apresentando alterações significativas na sua concentração de sólidos nem no teor de sólidos voláteis.
- Verifica-se que a granulometria das lamas digeridas é bastante uniforme sendo o diâmetro médio das partículas de cerca de $40\ \mu\text{m}$. Constata-se, também, que ocorre uma fracturação mecânica das partículas devido às sucessivas passagens pela instalação destinada aos estudos hidrodinâmicos.
- Os estudos hidrodinâmicos efectuados revelam que o comportamento hidrodinâmico das lamas digeridas é bastante estável, confirmando-se, nesta segunda série de experiências, os resultados obtidos durante a primeira série. Conclui-se, assim, que as lamas digeridas, com concentrações em sólidos na gama de 1,2 a 1,4%, apresentam um acentuado carácter não-Newtoniano sendo o seu comportamento reológico bem definido a partir do modelo de *Herschell-Bulkley*.
- Verifica-se, ainda, que os estudos realizados não alteraram, significativamente, o valor do *coeficiente de consistência* e do *índice de potência* da lama que se mantiveram muito aproximados a, respectivamente, $0,0018\ \text{N.s}^n/\text{m}^2$ e 1,16. Refira-se que o coeficiente de consistência referido é cerca de 1,57 vezes superior ao coeficiente de viscosidade dinâmico da água à temperatura de 15°C .
- Verifica-se, também, que a *tensão de cedência* da lama sofre uma gradual redução ao longo das experiências que estará relacionada com a passagem sucessiva das lamas no circuito fechado destinado aos estudos hidrodinâmicos e, ainda, com a alteração existente na granulometria das partículas sólidas. Na prática, constata-se que a tensão de cedência baixa de $0,370\ \text{N/m}^2$ para um valor de $0,240\ \text{N/m}^2$ o que representa uma redução de cerca de 35,1%.
- Confirmam-se as conclusões estabelecidas em 7.2.1.1. relativas à aplicabilidade da fórmula de *Dodge e Metzner*. Reafirma-se, no entanto, que a gama de medições em regime turbulento é reduzida e confirmam-se, também, as conclusões relativas à pouca significância e origem do erro médio das medições. Verifica-se, também, que a tubagem de $2^{1/2}$ é a que apresenta ajustes menos rigorosos em relação ao comportamento reológico definido. Este facto é, em certa medida, compreensível porque os valores medidos para a pressão diferencial nesta conduta são muito baixos e, assim, uma pequena interferência nas leituras pode provocar alterações percentuais acentuadas nos valores medidos.
- Embora se trate do escoamento de uma suspensão, não se detecta a ocorrência de redução do arrasto no escoamento deste fluido. A ocorrência em algumas medições de um ligeiro retardamento na

passagem para o regime turbulento não se considera suficientemente explícita para justificar a consideração de um comportamento do tipo do modelo 1 apresentado na *figura 53* que está associado à existência de concentrações reduzidas de polímeros.

7.3. EXPERIÊNCIAS COM LAMAS EM DIGESTÃO ANAERÓBIA

Com base na experiência adquirida na fase preliminar com água e durante as duas séries de experiências com lamas digeridas, considerou-se conveniente realizar algumas alterações no funcionamento da instalação experimental existente para permitir acompanhar, experimentalmente, de uma forma integral, o processo de digestão anaeróbia aquecida das lamas e, em paralelo, analisar em que medida a evolução deste processo pode afectar as condições em que se realiza o transporte sob pressão das lamas nas condutas.

Realizaram-se, por isso, alterações significativas na instalação experimental, sobretudo no reservatório de armazenamento das lamas, que permitiram transformá-lo num reactor biológico anaeróbio aquecido com agitação, nas condições já indicadas na *figura 54*.

Nesta instalação realizaram-se, então, duas séries de experiências que decorreram entre *Abril e Junho de 1995*, onde se obtiveram os resultados que permitiram, em última análise, formular um modelo para o escoamento das lamas em condutas sob pressão.

Esta fase dos testes incluiu, tal como a primeira, duas séries de ensaios com lamas provenientes, também, da *ETAR de Parada, na Maia*. Nestes ensaios foi possível acompanhar o processo de digestão anaeróbia das lamas desde o instante inicial, correspondente à introdução no sistema das lamas primárias até ao instante final, passados 1,5 meses, em que se retiraram do sistema lamas digeridas.

Nesta segunda fase foi possível realizar com sucesso os seguintes testes às lamas:

- Sólidos totais e voláteis;
- pH e correcção do pH;
- Biogás;
- Estudos reológicos;
- Estudos hidrodinâmicos;
- Estudos granulométricos.

Apresentam-se, em seguida, os resultados obtidos nos estudos experimentais efectuados com lamas em digestão anaeróbia.

7.3.1. Primeira Série de Experiências com Lamas em Digestão Anaeróbia

Na *ETAR de Parada* as lamas primárias e as activadas em excesso são conduzidas em conjunto até um espessador gravítico onde são sujeitas a um espessamento antes de serem encaminhadas para o digestor primário.

A montante do digestor primário existe, assim, um poço de bombagem para as lamas espessadas destinado a alimentar os grupos electro-bomba que realizam a elevação das lamas espessadas para o digestor. Foi nesse poço de bombagem que se procedeu à colheita das lamas utilizadas nos estudos efectuados.

A primeira recolha de lamas espessadas ocorreu no dia 03/04/95.

Durante esta série de experiências realizaram-se cinco análises laboratoriais para determinação da concentração de sólidos totais e sólidos voláteis existentes nas lamas.

Alguns destes resultados necessitam, no entanto, de ser corrigidos para atender às duas correcções do valor do pH que se realizaram durante esta série de experiências.

Com efeito, realizaram-se duas correcções do valor do pH das lamas para conseguir manter esse valor na gama de 6,0 a 8,0. As correcções foram realizadas nos dias 11/04/95 e 28/05/95, tendo-se aumentado o valor do pH das lamas de cerca de 6,0 para cerca de 7,7 com a adição de 350 mg/l de cal. Note-se que adição de cal faz aumentar o teor em sólidos totais das lamas e, consequentemente, aumentou artificialmente a percentagem de redução de sólidos voláteis.

Apresenta-se, no *quadro 17*, os resultados obtidos nas análises para determinação da concentração em sólidos e, também, os valores previsíveis se se retirar à concentração de sólidos totais o valor da concentração de cal adicionada às lamas.

Experiência	Data	ST			SV		
		(mg/l)	medido (%)	real (%)	(mg/l)	medido (%)	real % ST
1ª	04/04/95	27 580	2,76	2,76	21 650	78,5	78,5
2ª	11/04/95	24 130	2,41	2,41	18 250	75,6	75,6
3ª	19/04/95	22 180	2,22	2,18	15 890	71,6	72,9
4ª	28/04/95	20 370	2,04	2,00	14 120	69,3	70,6
5ª	08/05/95	19 970	2,00	1,93	13 500	67,6	70,1

quadro 17 – Resultados obtidos nas análises efectuadas para determinação da concentração em sólidos na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Verifica-se, assim, que ocorreu uma redução gradual da concentração de sólidos voláteis na amostra de lama analisada o que constitui um indicador seguro sobre a ocorrência de um processo de digestão anaeróbia em condições bastante razoáveis no interior do digestor.

Comparando os valores obtidos para as lamas no final do processo de digestão com os valores das lamas digeridas estudadas anteriormente, verifica-se que estas lamas apresentam uma maior concentração de sólidos totais mas, a percentagem de sólidos voláteis é sensivelmente idêntica. Este facto está de acordo com a hipótese de ocorrência de um espessamento das lamas no digester secundário como razão principal para a baixa concentração de sólidos nas lamas digeridas aí recolhidas.

Apresenta-se, na **figura 100**, um gráfico onde se pode observar a evolução real da concentração de sólidos totais e voláteis nas lamas durante o processo de digestão anaeróbia.

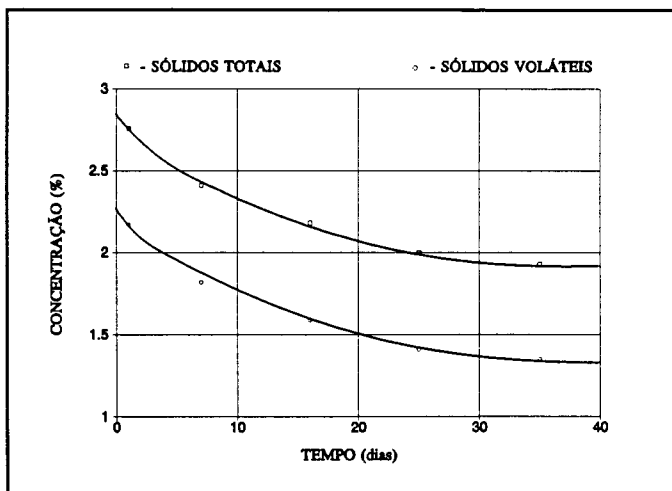


figura 100 – Evolução do teor em sólidos totais e voláteis na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

A produção de biogás foi, também, medida durante o processo de digestão anaeróbia de lamas. Apresenta-se, na **figura 101**, a evolução ocorrida na produção de biogás durante esta série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

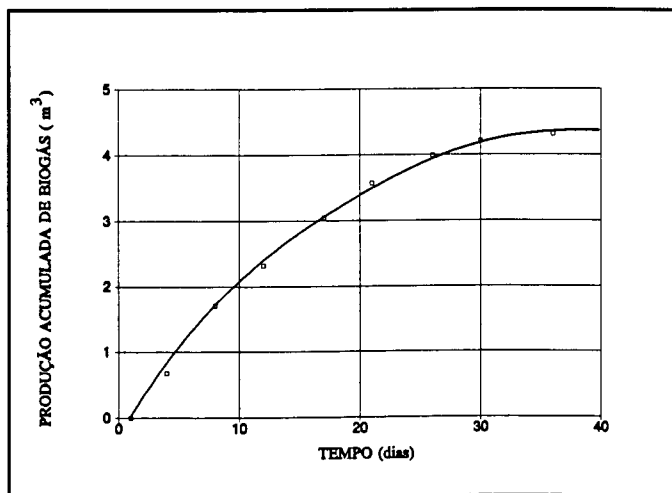


figura 101 – Produção acumulada de biogás na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Comparando a produção de biogás com a quantidade de sólidos voláteis destruída, verifica-se que a produção média foi de cerca de $0,71 \text{ m}^3/\text{kg SV}_{\text{destruído}}$, isto é, algo inferior à produção teórica previsível que, como foi referido no **Capítulo 3**, deveria ser de cerca de $1 \text{ m}^3/\text{kg SV}_{\text{destruído}}$.

Refere-se, no entanto, que na instalação ocorreu, ainda, libertação de biogás pelo dispositivo destinado a purgar as tomadas de pressão, pelo que o valor total da produção de biogás deverá ser mais próximo do valor teórico indicado e, além disso, que as condições de operação do sistema não são exactamente idênticas às existentes no reactor existente nas ETAR's, por não se realizar uma alimentação periódica de lamas espessadas.

Nesta série de experiências realizaram-se, com sucesso, estudos reológicos às lamas que permitiram definir, com bastante rigor, qual o modelo reológico que caracteriza com maior exactidão o comportamento exibido pela lama.

Verificou-se, assim, que a utilização de cilindros rotativos com uma geometria **Z2 DIN** permite a realização de ensaios reológicos às lamas.

Nesta série de experiências realizaram-se seis ensaios reológicos às lamas cada um constituído por dois testes distintos. Estes testes abrangeram, assim, a totalidade do processo de digestão anaeróbia das lamas e permitiram confirmar os resultados obtidos nos estudos hidrodinâmicos.

Os testes efectuados consistiram em testes com controlo da velocidade da deformação angular e medição dos valores da tensão tangencial. Em cada teste seguiu-se sempre a mesma metodologia que consistiu num ciclo completo de medições desde um valor mínimo, para a velocidade de deformação angular de $0,01 \text{ s}^{-1}$, até um valor máximo, imposto pelo tipo de geometria utilizada, de 1000 s^{-1} .

Após a realização do teste aplicaram-se cinco modelos reológicos distintos aos resultados obtidos, designadamente, os modelos *Newtoniano*, lei de potência, plástico de *Bingham*, *Casson* e *Herschell-Bulkley* tendo-se determinado a equação que melhor ajusta os resultados e o desvio padrão e o coeficiente de correlação do ajuste efectuado.

No **quadro 18** apresentam-se os resultados obtidos nos estudos reológicos e, por sua vez, no **quadro 19** os elementos estatísticos referentes aos testes realizados. Os estudos reológicos foram sempre realizados no mesmo dia dos estudos hidrodinâmicos correspondentes à experiência.

Considerou-se, em seguida, que a equação reológica que melhor traduz, para cada modelo, o comportamento do fluido corresponde ao valor médio dos parâmetros reológicos previstos em cada teste.

Por último, adoptou-se o modelo de *Herschell-Bulkley* como o modelo que melhor representa o comportamento reológico da lama e comparou-se a evolução dos valores da viscosidade dinâmica medidos no teste com os valores esperados por aplicação desse modelo.

Experiência	Teste	MODELO REOLÓGICO ($\gamma = dv/dr$)				
		Newtoniano	Lei de Potência	Plástico de Bingham	Casson	Herschell-Bulkley
1ª	1º	$\tau = 0,02252 \gamma$	$\tau = 0,94947 \gamma^{0,30765}$	$\tau = 1,12218 + 0,01737 \gamma$	$\tau^{0,5} = 0,8956^{0,5} + (0,00778 \gamma)^{0,5}$	$\tau = 0,64903 + 0,35090 \gamma^{0,47137}$
	2º	$\tau = 0,02258 \gamma$	$\tau = 1,02689 \gamma^{0,29286}$	$\tau = 1,18635 + 0,01713 \gamma$	$\tau^{0,5} = 0,9555^{0,5} + (0,00745 \gamma)^{0,5}$	$\tau = 0,71144 + 0,35363 \gamma^{0,46782}$
2ª	1º	$\tau = 0,01820 \gamma$	$\tau = 0,55029 \gamma^{0,4750}$	$\tau = 1,17060 + 0,01600 \gamma$	$\tau^{0,5} = 0,8484^{0,5} + (0,00875 \gamma)^{0,5}$	$\tau = 0,75612 + 0,16660 \gamma^{0,62740}$
	2º	$\tau = 0,01870 \gamma$	$\tau = 0,50163 \gamma^{0,4574}$	$\tau = 1,08915 + 0,01599 \gamma$	$\tau^{0,5} = 0,7815^{0,5} + (0,00895 \gamma)^{0,5}$	$\tau = 0,66226 + 0,17410 \gamma^{0,62011}$
3ª	1º	$\tau = 0,01483 \gamma$	$\tau = 0,1160 \gamma^{0,6635}$	$\tau = 0,62624 + 0,01327 \gamma$	$\tau^{0,5} = 0,3808^{0,5} + (0,00849 \gamma)^{0,5}$	$\tau = 0,58113 + 0,02123 \gamma^{0,92517}$
	2º	$\tau = 0,01656 \gamma$	$\tau = 0,17662 \gamma^{0,6124}$	$\tau = 0,69971 + 0,01484 \gamma$	$\tau^{0,5} = 0,4299^{0,5} + (0,00948 \gamma)^{0,5}$	$\tau = 0,51560 + 0,05582 \gamma^{0,78928}$
4ª	1º	$\tau = 0,01261 \gamma$	$\tau = 0,02845 \gamma^{0,8680}$	$\tau = 0,37017 + 0,01169 \gamma$	$\tau^{0,5} = 0,1677^{0,5} + (0,00859 \gamma)^{0,5}$	$\tau = 0,41751 + 0,00593 \gamma^{1,10801}$
	2º	$\tau = 0,01245 \gamma$	$\tau = 0,03431 \gamma^{0,8352}$	$\tau = 0,39898 + 0,01145 \gamma$	$\tau^{0,5} = 0,1947^{0,5} + (0,00817 \gamma)^{0,5}$	$\tau = 0,43751 + 0,00658 \gamma^{1,08802}$
5ª	1º	$\tau = 0,01115 \gamma$	regressão	$\tau = 0,283122 + 0,01045 \gamma$	$\tau^{0,5} = 0,1009^{0,5} + (0,00817 \gamma)^{0,5}$	$\tau = 0,34345 + 0,00375 \gamma^{1,16235}$
	2º	$\tau = 0,01128 \gamma$	impossível	$\tau = 0,27431 + 0,01059 \gamma$	$\tau^{0,5} = 0,0944^{0,5} + (0,00837 \gamma)^{0,5}$	$\tau = 0,33957 + 0,00352 \gamma^{1,17507}$
6ª	1º	$\tau = 0,01062 \gamma$	regressão	$\tau = 0,18018 + 0,01018 \gamma$	$\tau^{0,5} = 0,0236^{0,5} + (0,00917 \gamma)^{0,5}$	$\tau = 0,26065 + 0,00228 \gamma^{1,23771}$
	2º	$\tau = 0,01061 \gamma$	impossível	$\tau = 0,21737 + 0,01007 \gamma$	$\tau^{0,5} = 0,0513^{0,5} + (0,00850 \gamma)^{0,5}$	$\tau = 0,29278 + 0,00249 \gamma^{1,22215}$

quadro 18 – Resultados obtidos nos estudos reológicos realizados na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Experiência	Teste	MODELO REOLÓGICO ($\gamma=dv/dr$)											
		Newtoniano		Lei de Potência		Plástico de Bingham		Casson		Herschell-Bulkley		Coef. Correlação	
		Desvio Padrão	Coef. Correlação	Desvio Padrão	Coef. Correlação	Desvio Padrão	Coef. Correlação	Desvio Padrão	Coef. Correlação	Desvio Padrão	Coef. Correlação		
1ª	1º	1,103	0,749	0,290	0,985	0,454	0,962	0,229	0,991	0,100	0,998		
	2º	1,156	0,711	0,303	0,983	0,453	0,961	0,223	0,991	0,088	0,999		
2ª	1º	1,222	0,880	0,576	0,975	0,603	0,972	0,366	0,990	0,388	0,989		
	2º	1,167	0,891	0,552	0,977	0,619	0,971	0,390	0,988	0,408	0,987		
3ª	1º	0,649	0,951	0,512	0,970	0,312	0,989	0,299	0,990	0,306	0,989		
	2º	0,765	0,949	0,499	0,978	0,434	0,984	0,329	0,991	0,374	0,988		
4ª	1º	0,415	0,974	0,397	0,976	0,243	0,991	0,294	0,987	0,231	0,992		
	2º	0,432	0,971	0,405	0,974	0,235	0,991	0,284	0,987	0,226	0,992		
5ª	1º	0,320	0,981	-	-	0,191	0,993	0,257	0,988	0,160	0,995		
	2º	0,330	0,980	-	-	0,216	0,992	0,274	0,986	0,185	0,994		
6ª	1º	0,267	0,986	-	-	0,212	0,991	0,258	0,987	0,156	0,995		
	2º	0,289	0,983	-	-	0,211	0,991	0,264	0,986	0,163	0,995		

quadro 19 – Elementos estatísticos relativos aos ajustes de modelos reológicos aos resultados obtidos na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Apresenta-se, então, nas *figuras B.1 a B.36* do **Anexo B**, uma representação gráfica dos resultados obtidos e da equação que, para cada modelo reológico, melhor ajusta os resultados obtidos. Inclui-se, ainda, em cada experiência efectuada, os valores obtidos para a relação entre a velocidade de deformação angular e a viscosidade dinâmica e curva que representa essa relação por aplicação do modelo reológico *Herschell-Bulkley*.

Com base nos resultados apresentados verifica-se, facilmente, que os modelos reológicos que melhor se ajustam aos resultados obtidos nos estudos reológicos são aqueles que incluem como elemento definidor a *tensão de cedência*, isto é, por ordem crescente de ajuste, os modelos plástico de *Bingham*, de *Casson* e de *Herschell-Bulkley*. Por sua vez, os ajustes realizados pelos modelos *Newtoniano* e lei de potência estão bastante afastados da realidade.

Analisando os resultados experimentais, constata-se que no ajuste pelo modelo de *Herschell-Bulkley*, os valores obtidos nos ensaios reológicos na gama das muito baixas velocidades de deformação apresentam tensões tangenciais sempre inferiores às resultantes da aplicação do modelo, coincidindo essa gama de velocidades de deformação com a zona onde o ajuste do modelo de *Herschell-Bulkley* apresenta piores resultados. Este facto deverá estar, em princípio, relacionado com a ocorrência de deslizamento nas medições a muito baixas velocidades de deformação.

Com efeito, o reómetro utilizado, do tipo cilindros concêntricos, é em aço inoxidável e apresenta, por isso, uma superfície extremamente polida em contacto com o fluido, o que poderá justificar a ocorrência de deslizamento.

Por este motivo, o ajuste conseguido pelo modelo de *Herschell-Bulkley*, poderá ser, na prática, ainda melhor do que o indicado, pois o comportamento reológico do fluido, em condições de não deslizamento, deverá conduzir a tensões tangenciais um pouco mais elevadas na gama das muito baixas velocidades de deformação angular.

Seguindo uma metodologia idêntica à indicada em 7.2., apresenta-se, no *quadro 20*, um resumo das condições em que se realizaram os estudos hidrodinâmicos durante a primeira série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Apresentam-se, ainda, no *quadro 21*, alguns elementos estatísticos referentes aos ensaios.

Note-se que, durante as experiências realizadas com lamas em digestão anaeróbia, o número de medições efectuadas por teste foi substancialmente inferior ao efectuado nas experiências com lamas digeridas. As razões subjacentes a esta opção são as seguintes:

- Atendendo à rápida variação existente nas características reológicas das lamas durante o processo de digestão anaeróbia, houve necessidade de encurtar a duração das experiências para minimizar a influência da evolução do processo de digestão e aproximar, assim, os valores obtidos nos estudos reológicos e hidrodinâmicos.

- Reduzir o tempo de funcionamento do circuito fechado destinado aos estudos hidrodinâmicos, procurando minimizar, assim, os efeitos da fracturação das partículas sólidas, detectada durante as experiências com lamas digeridas.

Experiência	Tubagem	Dia do ensaio	Figura nº	Temperatura (°C)	$\mu_{\text{água}}$ (N.s/m ²)
1ª	1"	05/04/95	A.40	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2"	04/04/95	A.41	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	04/04/95	A.42	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
2ª	1"	12/04/95	A.43	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2"	11/04/95	A.44	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	11/04/95	A.45	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
3ª	1"	19/04/95	A.46	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2"	18/04/95	A.47	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	18/04/95	A.48	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
4ª	1"	27/04/95	A.49	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2"	26/04/95	A.50	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	26/04/95	A.51	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
5ª	1"	05/05/95	A.52	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2"	04/05/95	A.53	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	04/05/95	A.54	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
6ª	1"	11/05/95	A.55	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2"	10/05/95	A.56	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	10/05/95	A.57	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$

quadro 20 – Elementos sobre os estudos hidrodinâmicos realizados na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Tubagem	Experiência	Número de medições	Desvio Padrão (na determinação da perda de carga)			Erro médio (% do valor medido)
			valor máximo	valor mínimo	valor médio	
1"	1ª	63	4,083	0,042	0,582	0,32
	2ª	31	5,550	0,068	0,819	0,56
	3ª	45	1,652	0,022	0,303	0,18
	4ª	44	1,550	0,069	0,312	0,31
	5ª	42	0,735	0,000	0,198	0,29
	6ª	46	1,794	0,033	0,381	0,41
2"	1ª	40	0,256	0,015	0,138	0,54
	2ª	45	0,548	0,040	0,174	0,65
	3ª	41	0,338	0,047	1,153	1,18
	4ª	46	0,420	0,038	1,128	1,32
	5ª	45	0,170	0,054	0,080	1,19
	6ª	46	0,281	0,059	0,089	1,54
2"1/2	1ª	30	0,235	0,018	0,084	0,62
	2ª	47	0,292	0,031	0,087	0,63
	3ª	41	0,425	0,056	0,100	1,39
	4ª	40	0,159	0,069	0,082	1,78
	5ª	43	0,149	0,065	0,078	2,20
	6ª	36	0,272	0,061	0,077	2,66

quadro 21 – Elementos estatísticos referentes aos estudos hidrodinâmicos realizados na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Por último, durante a segunda série de experiências com lamas digeridas realizaram-se, ainda, os estudos granulométricos às lamas apresentados no *quadro 22* e nas *figuras C.19 a C.33* do Anexo C.

Dia do ensaio	Experiência	Figura n°	Diâmetro médio (μm)	C_u	C_c
04/04/95	1.1	C.19	36,11	2,8	1,01
	1.2	C.20	35,96		
11/04/95	2.1	C.22	33,66	3,9	1,23
	2.2	C.23	34,07		
19/04/95	3.1	C.25	30,99	4,3	1,14
	3.2	C.26	31,50		
28/04/95	4.1	C.28	29,45	4,3	1,14
	4.2	C.29	28,80		
08/05/95	5.1	C.31	26,86	6,4	1,88
	5.2	C.32	26,70		

quadro 22 – Resultados obtidos nos estudos granulométricos realizados na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Importa referir que os resultados obtidos nos estudos granulométricos podem ter sido ligeiramente afectados pelas adições de cal efectuadas às lamas, tendo em vista a correcção do seu pH. No entanto, não se detectam alterações significativas nos resultados globais obtidos, quando comparados com a evolução registada durante os ensaios com lamas digeridas.

Salienta-se, ainda, a evolução registada no coeficiente de uniformidade que apresentou uma evolução sempre crescente entre um valor inicial de 2,8 e um valor final de 6,4. este facto deve estar relacionado com o processo de digestão das lamas pois o valor obtido na última experiência, correspondente a lamas já digeridas, aproxima-se dos valores obtidos nas experiências anteriores.

Apresenta-se, ainda, na *figura 102*, a evolução do diâmetro médio das partículas sólidas durante esta série de experiências.

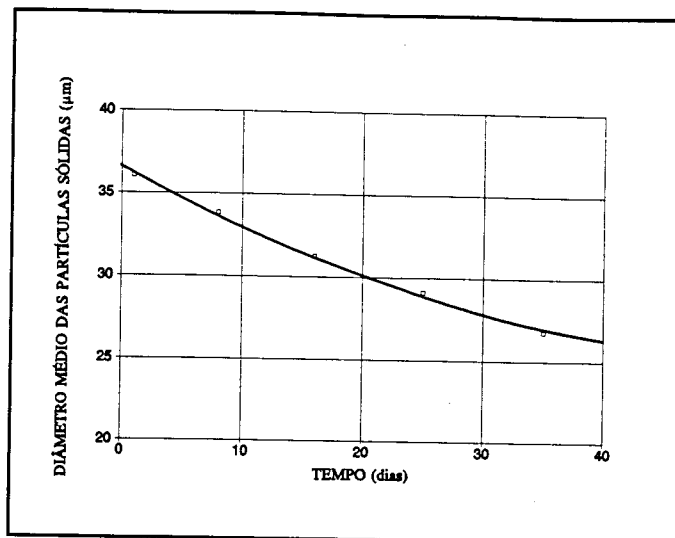


figura 102 – Evolução do diâmetro médio das partículas sólidas na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Verifica-se, assim, que o diâmetro médio das partículas sólidas sofreu uma redução global de cerca de 26% o que, embora seja bastante significativo, representa uma redução de cerca de 10% em relação aos valores obtidos durante as experiências com lamas digeridas.

7.3.1.1. Análise dos Resultados Obtidos

Os resultados obtidos nas análises à concentração de sólidos nas lamas, revelam que as lamas brutas espessadas recolhidas apresentam uma concentração de sólidos totais (2,76%), um pouco inferior ao limite mínimo indicado no **quadro 4** do **Capítulo 3**, que era de 3% a 6%, onde se resumem os critérios, normalmente, indicados na bibliografia da especialidade. Além disso, a percentagem em sólidos voláteis existente nessas lamas (78,5%) é, também, superior ao limite máximo indicado nesse **quadro** (70%). Estes elementos poderão estar relacionados, uma vez que a elevada percentagem em matéria orgânica nas lamas pode constituir um factor impeditivo da ocorrência de um razoável grau de espessamento.

Além disso, a análise da evolução da concentração em sólidos totais e em sólidos voláteis ao longo do período de digestão das lamas revela que ocorreu uma diminuição de cerca de 8,5% dos sólidos voláteis em consequência desse processo. Verifica-se, assim, que a percentagem de sólidos totais nas lamas digeridas é de cerca de 1,9% sendo 70% destes sólidos de natureza orgânica. Comparando estes valores com os indicados nas experiências realizadas com lamas digeridas, verifica-se que a concentração em sólidos totais é bastante maior nesta experiência, mas a percentagem de sólidos voláteis é sensivelmente idêntica.

É possível, então, concluir que o processo de digestão anaeróbia verificado no reator biológico ocorreu de uma forma semelhante à verificada na *ETAR de Parada*, uma vez que a redução em sólidos voláteis é sensivelmente a mesma. Por sua vez, as colheitas de lamas digeridas no digestor secundário durante as

experiências anteriores não foram as ideais, pois a concentração das lamas à profundidade a que se realizaram as colheitas é inferior à concentração provável das lamas à saída do digestor primário.

O acompanhamento da produção de biogás permitiu, também, acompanhar a evolução do processo de digestão anaeróbia verificado no reactor biológico. Constatou-se, assim, que a taxa de produção de biogás é bastante aceitável, se atendermos às limitações inerentes ao próprio funcionamento da instalação experimental, e traduz com razoável precisão o ritmo de redução de sólidos voláteis verificado nas lamas.

Constatou-se, no entanto, que, quando o valor do pH das lamas se aproximava do limite mínimo admissível de 6,0, ocorria uma redução da taxa de produção de biogás que era rapidamente corrigida após a realização da respectiva correcção com adição de cal.

Relativamente aos estudos reológicos, verificou-se que o modelo que melhor se ajusta ao comportamento reológico exibido pela lama é o modelo de *Herschell-Bulkley*. A aplicação deste modelo conduz à obtenção dos coeficientes de correlação mais elevados (0,987 a 0,999) e, simultaneamente, aos menores desvios padrão, em todos os ensaios reológicos efectuados.

Apresenta-se, nas *figuras 103, 104 e 105*, a evolução existente, ao longo do processo de digestão da lama, nos três parâmetros reológicos do modelo de *Herschell-Bulkley*, respectivamente, *tensão de cedência*, *coeficiente de consistência* e *índice de potência*.

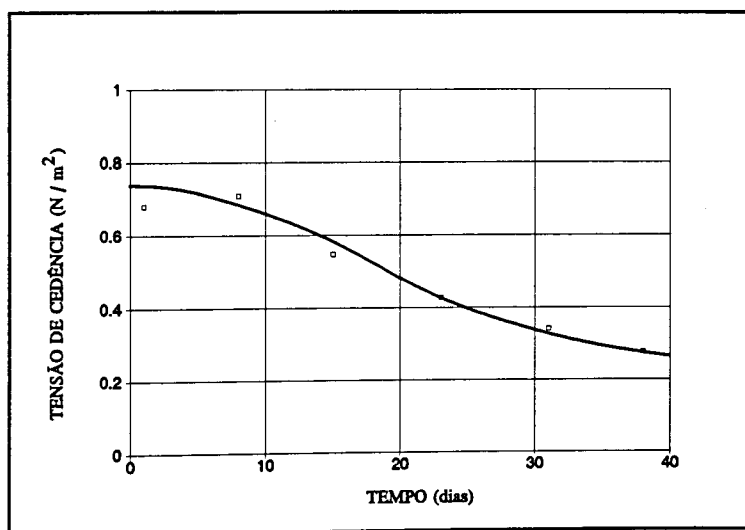


figura 103 – Evolução da tensão de cedência, na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

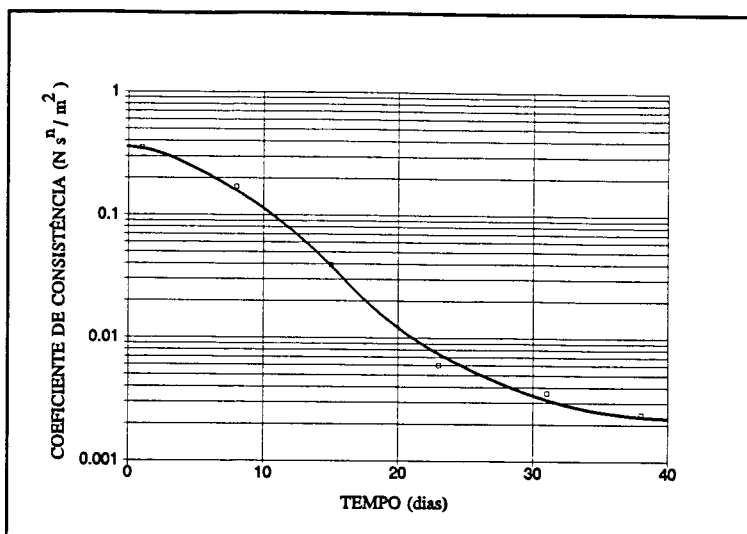


figura 104 – Evolução do coeficiente de consistência, na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

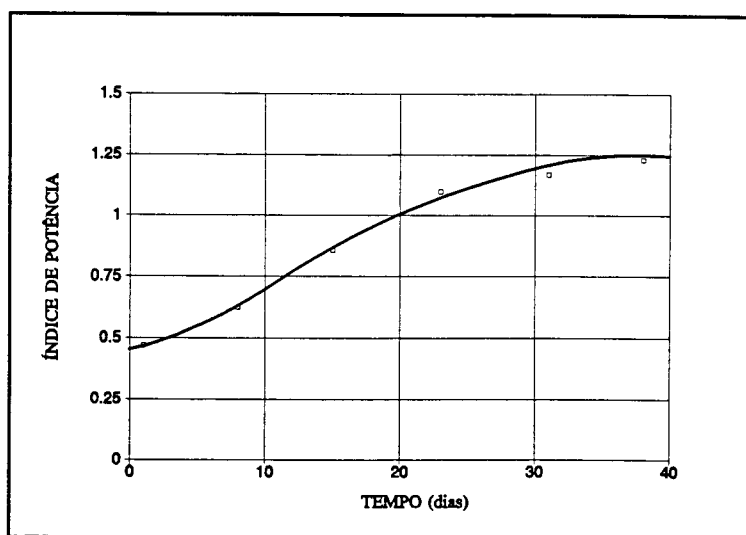


figura 105 – Evolução do índice de potência, na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Verifica-se, pois, que os parâmetros reológicos sofrem uma variação muito importante durante o processo de digestão anaeróbia da lama.

Apresenta-se no **quadro 23** as características reológicas da lama bruta espessada e da mesma lama após o processo de digestão anaeróbia.

Comparando os resultados obtidos para a lama digerida com os resultados previstos nas experiências com lamas digeridas verifica-se uma notável semelhança. Assim, os valores previstos nessas experiências foram de $0,300 \text{ N/m}^2$ – $0,370 \text{ N/m}^2$ para a *tensão de cedência*, $0,0018 \text{ N s}^2/\text{m}^2$ para o *coeficiente de consistência* e de 1,16 para o *índice de potência*.

Parâmetro	Lama Bruta Espessada	Lama Digerida	Variação	
			Valor	%
Tensão de Cedência, τ_c (N/m ²)	0,680	0,277	- 0,410	- 59,3
Coefficiente de Consistência, K (Ns ⁿ /m ²)	0,352	0,0024	- 0,3496	- 99,3
Índice de Potência, n	0,470	1,230	0,760	+ 161,7

quadro 23 – Variação dos parâmetros reológicos da lama durante o processo de digestão, na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Note-se, ainda, que a maior concentração de sólidos existente na lama digerida utilizada nesta experiência 1,93% contra os 1,2 a 1,4% das lamas digeridas, anteriormente estudadas, justifica o aumento do valor do *coeficiente de consistência* e do *índice de potência*. Por sua vez, a redução ocorrida no valor da *tensão de cedência* pode, também, ser interpretado como resultado da circulação das lamas no circuito fechado destinado aos estudos hidrodinâmicos. Com efeito, é mais razoável estabelecer a comparação entre os valores da *tensão de cedência* desta lama com a das lamas digeridas estudadas nas experiências anteriores, no final do período experimental. Deste modo, considera-se, em ambos os casos, o efeito nas lamas das passagens sucessivas no circuito hidráulico fechado. Conclui-se, assim, que o valor da *tensão de cedência* utilizado para comparação deve, antes, ser de 0,240 N/m², verificando-se que, também relativamente a este parâmetro, um aumento na concentração de sólidos conduziu a um aumento do seu valor.

No entanto, as flutuações existentes nos valores dos parâmetros reológicos das lamas digeridas são de muito pequena dimensão quando comparados com as grandes alterações ocorridas na passagem das lamas brutas espessadas para as lamas digeridas. Conclui-se, assim, que o processo de digestão anaeróbia das lamas tem uma importância enorme na alteração das características reológicas das lamas e, consequentemente, na sua viscosidade, como pode ser observado nas *figuras B.6, B.12, B.18, B.24, B.30 e B.36* do Anexo B.

Com base nos resultados reológicos obtidos é possível concluir que o transporte de lamas digeridas em condutas sob pressão realiza-se muito mais facilmente que o transporte de lamas brutas espessadas e conduz a importantes poupanças energéticas.

Para confirmar estes resultados, realizaram-se, também, na instalação experimental, estudos hidrodinâmicos semelhantes aos realizados durante as experiências com lamas digeridas. No entanto, não houve nesta série de experiências necessidade de estimar o valor do comportamento reológico da lama que melhor se ajusta aos resultados experimentais obtidos, mas, antes, analisar em que medida o modelo reológico previsto com base nos estudos reológicos, se adapta aos resultados obtidos nos estudos hidrodinâmicos.

Apresenta-se, nas *figuras 106 a 111*, num sistema de eixos adimensional (Re, λ), o resultado da aplicação do modelo reológico de *Herschell-Bulkley*, previsto a partir dos estudos reológicos, aos resultados obtidos nos estudos hidrodinâmicos.

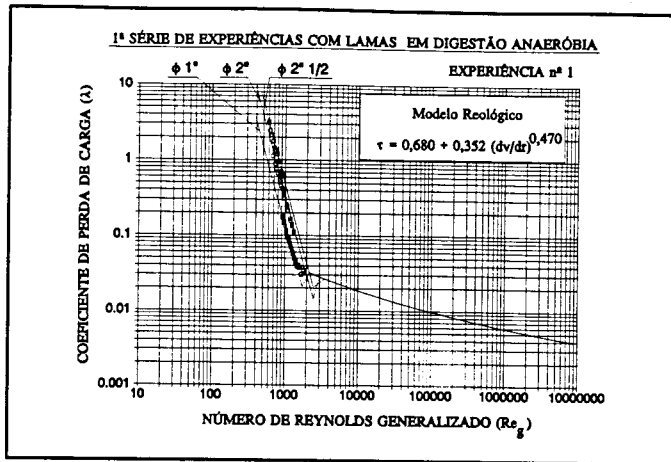


figura 106 – Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 1ª experiência da 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

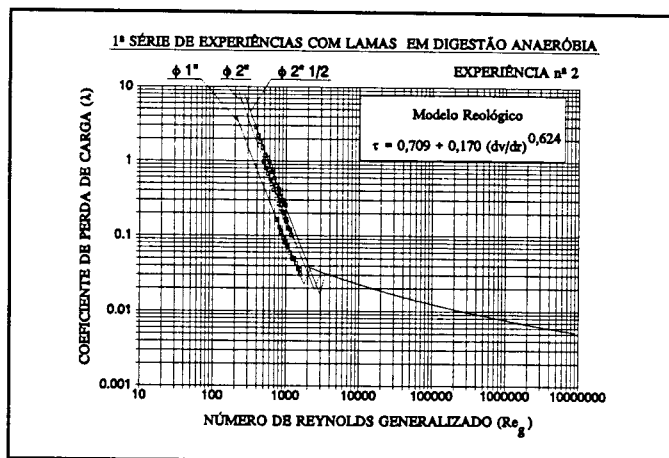


figura 107 – Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 2ª experiência da 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

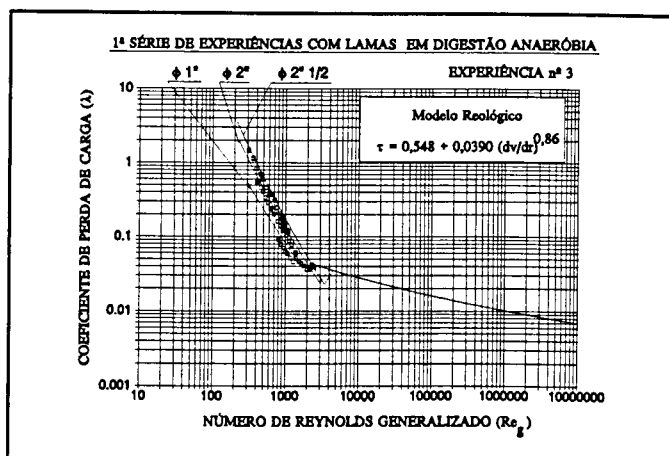


figura 108 – Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 3ª experiência da 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

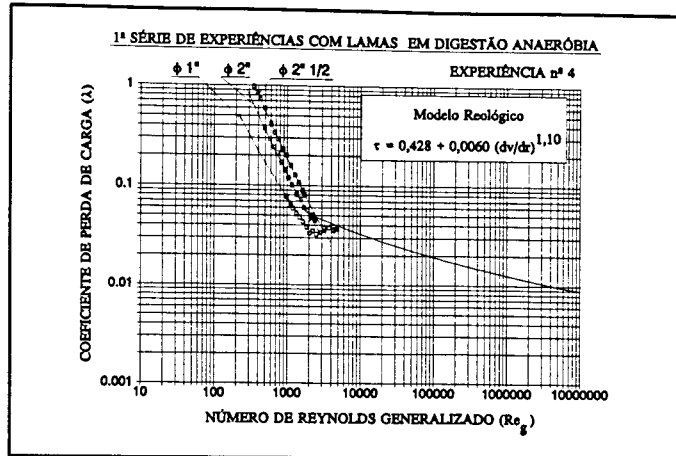


figura 109 – Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 4ª experiência da 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

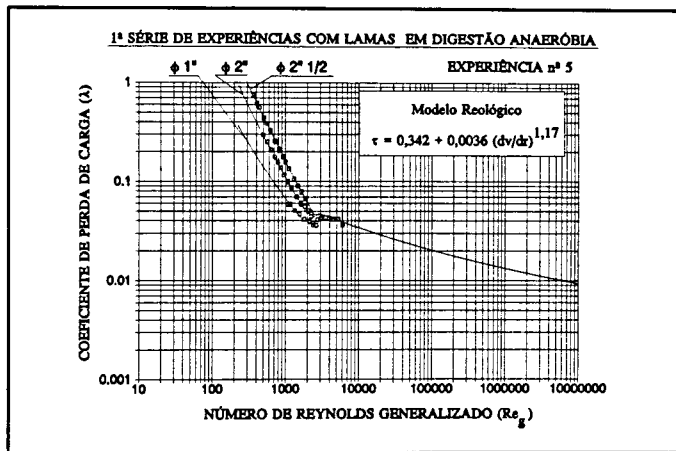


figura 110 – Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 5ª experiência da 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

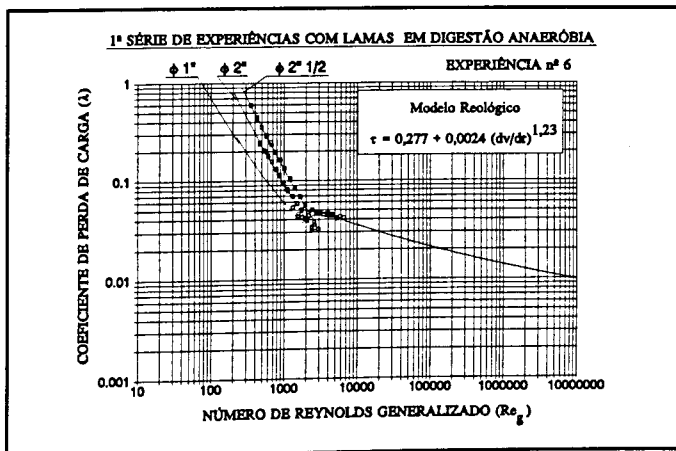


figura 111 – Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 6ª experiência da 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Analisando os resultados obtidos nos estudos hidrodinâmicos verifica-se que estes resultados ajustam-se bem a um comportamento reológico da lama do tipo previsto.

Verifica-se, também, que existem poucos resultados disponíveis com o escoamento em regime turbulento. Efectivamente, apenas nas duas últimas experiências na conduta de 1" foi possível atingir a fase inicial do regime turbulento. Por este motivo, embora a fórmula de *Dodge e Mezner* traduza, em princípio, com fidelidade, os resultados obtidos, considera-se que a gama de resultados em regime turbulento não é suficientemente extensa para se poderem formular conclusões definitivas.

Constata-se, ainda, que a transição do regime laminar para o turbulento ocorre sempre para valores do número de *Reynolds* generalizado na gama de 2000 a 4000, isto é, próximos dos valores indicados para fluidos sem *tensão de cedência*. Conclui-se, assim, que nas lamas produzidas nas ETAR's a transição do regime laminar para o turbulento não é retardada devido à existência de *tensão de cedência* pois, atendendo aos valores existentes para o *índice de potência*, os números de *Hedstrom* máximos quando se atinge a transição para o regime turbulento são, apenas, de cerca de 10^3 .

Por último, para os dois comportamentos reológicos limites referentes, respectivamente, à experiência nº 1 e à experiência nº 6 apresenta-se, na **figura 112**, para o regime turbulento, a relação entre o número de *Reynolds* generalizado e o coeficiente de proporcionalidade que traduz a razão entre os coeficientes de perda de carga para fluidos com um comportamento reológico desse tipo e fluidos *Newtonianos*.

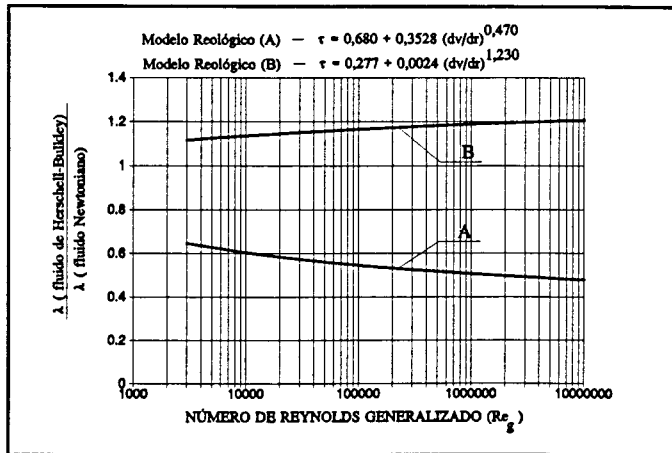


figura 112 – Limites para a relação entre os coeficientes de perda de carga das lamas e de um fluido Newtoniano com base nos resultados obtidos na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Os resultados obtidos nos estudos granulométricos permitem concluir que o diâmetro médio das lamas não é muito diferente das lamas brutas espessadas para as lamas digeridas, situando-se, em ambos os casos, na faixa dos 30 μm aos 40 μm .

No entanto, confirma-se a ocorrência de desgaste das partículas sólidas durante os testes resultante da passagem das lamas pela "mohn" bomba. Conseguiu-se, contudo, nesta série de experiências, diminuir

bastante a percentagem de redução das partículas sólidas através da redução do tempo de medição dos ensaios hidrodinâmicos.

Seguindo a classificação adoptada em mecânica dos solos para classificação de solos finos, referida anteriormente, verifica-se que as partículas sólidas existentes nas lamas, antes e após a digestão, são mal graduadas, isto é, são bastante uniformes. Além disso, confirma-se a ocorrência de uma evolução do coeficiente de uniformidade ao longo do período de testes que apresenta uma tendência para melhorar a graduação das partículas existentes, sobretudo devido ao aumento das partículas de pequena dimensão.

No final desta primeira série de experiências com lamas em digestão anaeróbia é possível retirar as seguintes conclusões dos estudos efectuados:

- A digestão anaeróbia das lamas na instalação experimental é sensivelmente semelhante à ocorrida no digestor anaeróbio da *ETAR de Parada*;
- A concentração de sólidos nas lamas é bastante superior à verificada durante os ensaios com lamas digeridas. Este facto permite concluir que a ocorrência de espessamento das lamas no digestor secundário afectou a concentração de sólidos nas lamas digeridas aí recolhidas.
- Durante o processo de digestão anaeróbia ocorre uma grande transformação nas características reológicas das lamas. Verificou-se, ainda, que o modelo de *Herschell-Bulkley* é, em todas as experiências, aquele que melhor traduz os resultados obtidos nos estudos reológicos.
- A evolução dos parâmetros reológicos ao longo do processo de digestão anaeróbia das lamas demonstra que a reologia das lamas está intimamente relacionada com o seu grau de estabilização. Verifica-se, ainda, que a convergência para uma lama estabilizada corresponde, em termos reológicos, à convergência para um comportamento reológico estável.
- Atendendo às características reológicas exibidas, confirmadas nos estudos hidrodinâmicos, o transporte em condutas sob pressão de lamas digeridas é muito mais fácil e vantajoso, em termos de consumo de energia, do que o de lamas primárias.
- Não é possível obter na instalação experimental existente, uma gama significativa de resultados que traduzam o escoamento em regime turbulento. Efectivamente, só para lamas digeridas e para uma gama muito reduzida de números de *Reynolds* generalizados foram obtidos resultados. No entanto, estes resultados parecem indicar que é possível utilizar a fórmula de *Dodge e Metzner* no cálculo das perdas de carga em regime turbulento liso.
- Nos ensaios granulométricos efectuados confirmou-se a evolução ocorrida durante a segunda série de experiências com lamas digeridas, tendo-se verificado uma diminuição gradual do diâmetro médio das partículas devido ao aumento significativo das partículas de pequeno diâmetro. No entanto, nestas experiências, foi possível reduzir em cerca de 10% o valor da diminuição do diâmetro médio das partículas.

- Verificou-se, ainda, que não existe uma grande alteração no diâmetro das partículas ao longo do processo de digestão das lamas, situando-se esse valor na gama dos 35 a 40 μm tanto para as lamas brutas espessadas como para as lamas digeridas. Este facto poderá indicar que o processo de digestão anaeróbia das lamas abrange, sobretudo, os sólidos coloidais e dissolvidos existentes nas lamas, indicados na *figura 1*. Os sólidos com dimensão superior a 1 μm , embora sejam fundamentalmente de natureza orgânica não são, em princípio, muito alterados durante a digestão anaeróbia.
- É, ainda, possível concluir que o comportamento reológico da lama é muito condicionado pela presença dos sólidos coloidais e dissolvidos. Com efeito, admitindo que as partículas sólidas de dimensão superior a 1 μm não sofreram alteração significativa durante o processo de digestão anaeróbia, toda a evolução ocorrida no comportamento reológico da lama ficou a dever-se à assimilação biológica das substâncias dissolvidas e coloidais.

7.3.2. Segunda Série de Experiências com Lamas em Digestão Anaeróbia

A segunda série de experiências com lamas em digestão anaeróbia seguiu a mesma metodologia definida em 7.3.1., ocorrendo a recolha de lamas espessadas no dia 18/05/95 e tal como na experiência anterior na *ETAR de Parada*.

Durante esta série de experiências realizaram-se seis análises laboratoriais para determinação da concentração de sólidos totais e sólidos voláteis existentes nas lamas.

Tal como ocorreu durante a primeira série de experiências com lamas em digestão anaeróbia, também agora houve necessidade de proceder a duas correcções de pH nas lamas para conseguir manter esse valor na gama de 6,0 a 8,0.

As correcções foram realizadas nos dias 25/05/95 e 14/06/95, tendo-se aumentado o valor do pH das lamas de cerca de 6,0 para cerca de 7,7 com a adição de 375 mg/l de cal.

Apresentam-se, no *quadro 24*, os resultados obtidos nas análises para determinação da concentração de sólidos e, também, os valores previsíveis no caso de ser retirado, à concentração de sólidos totais, o valor da concentração de cal adicionada às lamas.

Verifica-se, assim, que, nesta segunda série de experiências com lamas em digestão anaeróbia, a concentração de sólidos totais das lamas é substancialmente superior à da experiência anterior, situando-se estes valores dentro da gama de valores normais para lamas brutas espessadas.

Por sua vez, a percentagem de sólidos voláteis mantém-se superior aos valores indicados na bibliografia, mas é sensivelmente idêntica à determinada na experiência anterior. Além disso, a percentagem de sólidos voláteis no final do processo de digestão anaeróbia é de cerca de 70%, o que confirma todos os valores para este parâmetro medidos anteriormente, tanto no ensaio com lamas em digestão anaeróbia como nos ensaios com lamas digeridas.

Experiência	Data	ST			SV		
		(mg/l)	medido (%)	real (%)	(mg/l)	medido (%)	real % ST
1ª	18/05/95	39 070	3,91	3,91	30 230	77,4	77,4
2ª	25/05/95	35 700	3,57	3,57	26 840	75,2	75,2
3ª	01/06/95	33 420	3,34	3,30	24 280	73,5	73,5
4ª	07/06/95	31 230	3,12	3,09	22 020	70,5	71,4
5ª	14/06/95	30 360	3,04	3,00	21 110	69,5	70,4
6ª	21/06/95	30 270	3,03	2,95	20 670	68,3	70,0

quadro 24 – Resultados obtidos nas análises efectuadas para determinação da concentração em sólidos na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Importa, também, referir que o aumento do teor de sólidos verificado está, provavelmente, associado ao facto de se ter realizado a colheita das primeiras lamas saídas do espessador no final de um período de espessamento de um dia. Por este motivo, esta concentração de sólidos das lamas deve ser a máxima atingida no caso em estudo.

Apresenta-se, na *figura 113*, um gráfico onde se pode observar a evolução real da concentração de sólidos totais e voláteis nas lamas durante o processo de digestão anaeróbia.

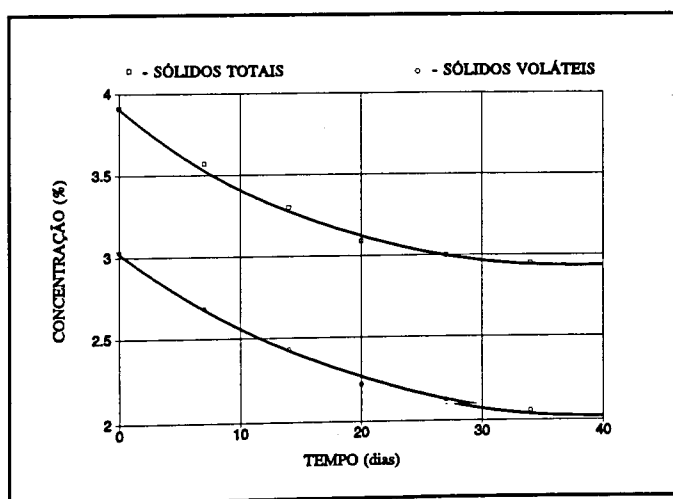


figura 113 – Evolução do teor em sólidos totais e voláteis na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Por sua vez, apresenta-se na *figura 114*, a evolução ocorrida na produção de biogás durante esta série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

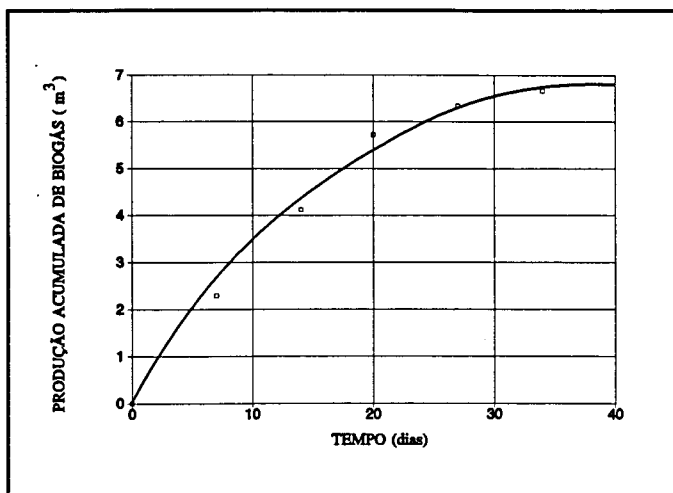


figura 114 – Produção acumulada de biogás na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Comparando a produção de biogás com a quantidade de sólidos voláteis destruída, verifica-se que a produção média foi de cerca de $0,70 \text{ m}^3/\text{kg SV}_{\text{destruído}}$, isto é, bastante semelhante à ocorrida durante a primeira série de experiências com lamas em digestão.

Relativamente aos ensaios reológicos, nesta série de experiências seguiu-se a metodologia indicada em 7.3.1., tendo-se realizado seis ensaios reológicos às lamas, cada um constituído por dois testes distintos.

Os testes realizados consistiram no controlo da velocidade da deformação angular e na medição dos valores da tensão tangencial. Em cada teste efectuado seguiu-se, sempre, a mesma metodologia que consistiu num ciclo completo de medições desde um valor mínimo para a velocidade de deformação angular de $0,01 \text{ s}^{-1}$ até um valor máximo (imposto pelo tipo de geometria utilizada) de 1000 s^{-1} .

Após a realização do teste aplicaram-se cinco modelos reológicos distintos aos resultados obtidos, designadamente, os modelos *Newtoniano*, lei de potência, plástico de *Bingham*, *Casson* e *Herschell–Bulkley*, tendo-se determinado a equação que melhor ajusta os resultados e o desvio padrão e o coeficiente de correlação do ajuste obtido.

No *quadro 25* apresentam-se os resultados obtidos nos estudos reológicos e, por sua vez, no *quadro 26*, os elementos estatísticos referentes aos testes realizados. Os estudos reológicos foram sempre realizados no dia em que se realizaram os estudos hidrodinâmicos correspondentes à experiência.

MODELO REOLÓGICO ($\gamma=dv/dr$)						
Experiência	Teste	Newtoniano	Lei de Potência	Plástico de Bingham	Casson	Herschell-Bulkley
1ª	1º	$\tau=0,02163 \gamma$	$\tau=0,92620 \gamma^{0,37994}$	$\tau=1,52711+0,01783 \gamma$	$\tau^{0,5}=1,16518^{0,5}+(0,00921 \gamma)^{0,5}$	$\tau=0,56700+0,53512 \gamma^{0,46229}$
	2º	$\tau=0,02171 \gamma$	$\tau=0,93154 \gamma^{0,37944}$	$\tau=1,54065+0,01787 \gamma$	$\tau^{0,5}=1,17512^{0,5}+(0,00921 \gamma)^{0,5}$	$\tau=0,60251+0,51675 \gamma^{0,46804}$
2ª	1º	$\tau=0,02068 \gamma$	$\tau=0,64663 \gamma^{0,43121}$	$\tau=1,32842+0,01738 \gamma$	$\tau^{0,5}=0,97095^{0,5}+(0,00936 \gamma)^{0,5}$	$\tau=0,86956+0,18554 \gamma^{0,62337}$
	2º	$\tau=0,02087 \gamma$	$\tau=0,68849 \gamma^{0,42237}$	$\tau=1,34868+0,01751 \gamma$	$\tau^{0,5}=0,99231^{0,5}+(0,00940 \gamma)^{0,5}$	$\tau=0,80904+0,23333 \gamma^{0,58840}$
3ª	1º	$\tau=0,01446 \gamma$	$\tau=0,06878 \gamma^{0,74577}$	$\tau=0,55469+0,01308 \gamma$	$\tau^{0,5}=0,31095^{0,5}+(0,00873 \gamma)^{0,5}$	$\tau=0,56849+0,01111 \gamma^{1,02593}$
	2º	—	—	$\tau=0,59173+0,01292 \gamma$	—	$\tau=0,60758+0,01068 \gamma^{1,03028}$
4ª	1º	$\tau=0,01159 \gamma$	regressão	$\tau=0,33557+0,01075 \gamma$	$\tau^{0,5}=0,14314^{0,5}+(0,00801 \gamma)^{0,5}$	$\tau=0,39319+0,00422 \gamma^{1,14860}$
	2º	$\tau=0,01203 \gamma$	impossível	$\tau=0,31720+0,01124 \gamma$	$\tau^{0,5}=0,12474^{0,5}+(0,00860 \gamma)^{0,5}$	$\tau=0,38118+0,00412 \gamma^{1,15936}$
5ª	1º	$\tau=0,01080 \gamma$	regressão	$\tau=0,26204+0,01015 \gamma$	$\tau^{0,5}=0,08192^{0,5}+(0,00814 \gamma)^{0,5}$	$\tau=0,34194+0,00230 \gamma^{1,23610}$
	2º	$\tau=0,01062 \gamma$	impossível	$\tau=0,30365+0,00989 \gamma$	$\tau^{0,5}=0,11689^{0,5}+(0,00751 \gamma)^{0,5}$	$\tau=0,37139+0,00281 \gamma^{1,19968}$
6ª	1º	$\tau=0,01070 \gamma$	regressão	$\tau=0,25450+0,01007 \gamma$	$\tau^{0,5}=0,06750^{0,5}+(0,00828 \gamma)^{0,5}$	$\tau=0,34193+0,00186 \gamma^{1,26814}$
	2º	$\tau=0,01029 \gamma$	impossível	$\tau=0,27429+0,00961 \gamma$	$\tau^{0,5}=0,09266^{0,5}+(0,00754 \gamma)^{0,5}$	$\tau=0,34713+0,00232 \gamma^{1,22596}$

quadro 25 – Resultados obtidos nos estudos reológicos realizados na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Experiência	Teste	MODELO REOLÓGICO ($\gamma=dv/dr$)									
		Newtoniano		Lei de Potência		Plástico de Bingham		Casson		Herschell-Bulkley	
		Desvio Padrão	Coef. Correlação	Desvio Padrão	Coef. Correlação	Desvio Padrão	Coef. Correlação	Desvio Padrão	Coef. Correlação	Desvio Padrão	Coef. Correlação
1ª	1º	1,683	0,820	0,377	0,992	0,954	0,946	0,552	0,982	0,263	0,996
	2º	1,684	0,820	0,383	0,992	0,937	0,948	0,532	0,984	0,252	0,996
2ª	1º	1,363	0,872	0,610	0,976	0,635	0,974	0,350	0,992	0,373	0,991
	2º	1,406	0,867	0,574	0,979	0,692	0,969	0,384	0,991	0,373	0,991
3ª	1º	0,567	0,960	0,505	0,969	0,279	0,991	0,316	0,988	0,278	0,991
	2º	–	–	–	–	0,242	0,993	–	–	0,241	0,993
4ª	1º	0,377	0,975	–	–	0,221	0,991	0,282	0,986	0,199	0,993
	2º	0,381	0,977	–	–	0,249	0,990	0,303	0,985	0,225	0,992
5ª	1º	0,331	0,978	–	–	0,230	0,990	0,290	0,983	0,182	0,994
	2º	0,339	0,976	–	–	0,198	0,992	0,273	0,984	0,158	0,995
6ª	1º	0,319	0,980	–	–	0,220	0,990	0,290	0,983	0,151	0,995
	2º	0,315	0,978	–	–	0,192	0,992	0,267	0,984	0,140	0,996

quadro 26 – Elementos estatísticos relativos aos ajustes de modelos reológicos aos resultados obtidos na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Considerou-se, também, que a equação reológica que melhor traduz o comportamento do fluido corresponde ao valor médio dos parâmetros reológicos previstos em cada teste. Com base nos resultados obtidos, adoptou-se o modelo de *Herschell–Bulkley* como o modelo que melhor representa o comportamento reológico da lama, tendo-se comparado a evolução dos valores da viscosidade dinâmica medidos no teste com os valores esperados por aplicação desse modelo.

Apresenta-se, nas *figuras B.37 a B.72 do Anexo B*, uma representação gráfica dos resultados obtidos e da equação que, para cada modelo reológico, melhor ajusta esses resultados. Inclui-se, ainda, em cada experiência efectuada, os valores obtidos para a relação da velocidade de deformação angular com a viscosidade dinâmica e a curva que representa essa relação por aplicação do modelo reológico *Herschell–Bulkley*.

Com base nos resultados apresentados constata-se que existe uma grande semelhança entre estes resultados e os obtidos na primeira série de experiências com lamas em digestão anaeróbia. Neste caso, os modelos reológicos que melhor se ajustam aos estudos reológicos são, também, aqueles que incluem como elemento definidor a *tensão de cedência*, isto é, por ordem crescente de correlação, os modelos plástico de *Bingham*, de *Casson* e de *Herschell–Bulkley*. Por sua vez, os ajustes realizados pelos modelos *Newtoniano* e lei de potência estão bastante afastados da realidade.

O modelo de *Herschell–Bulkley* é, efectivamente, o modelo mais indicado para representar o comportamento reológico das lamas produzidas nas ETAR's. Na realidade, nesta série de experiências o valor do coeficiente de correlação situou-se na gama de 0,991 a 0,996.

Confirma-se, também, a ocorrência de deslizamento nas medições efectuadas na gama das muito baixas velocidades de deformação. Por este motivo, o ajuste conseguido pelo modelo de *Herschell–Bulkley*, poderá ser, na prática, ainda melhor do que o indicado, pois o comportamento reológico do fluido, em condições de não deslizamento, deverá conduzir a tensões tangenciais um pouco mais elevadas na gama das muito baixas velocidades de deformação angular.

Comparando os resultados obtidos nesta série de experiências com a anterior, verifica-se que, embora a concentração em sólidos tenha aumentado mais de 1%, os valores dos parâmetros reológicos não apresentaram uma alteração significativa mantendo-se bastante semelhantes.

Seguindo uma metodologia idêntica à apresentada nos casos anteriores, apresenta-se, no *quadro 27*, um resumo das condições em que se realizaram os estudos hidrodinâmicos durante a segunda série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Apresentam-se, ainda, no *quadro 28*, elementos estatísticos referentes aos ensaios.

Experiência	Tubagem	Dia do ensaio	Figura n°	Temperatura (°C)	$\mu_{\text{água}}$ (N.s/m ²)
1ª	1"	18/05/95	A.58	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2"	19/05/95	A.59	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	19/05/95	A.60	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
2ª	1"	25/05/95	A.61	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2"	26/05/95	A.62	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	26/05/95	A.63	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
3ª	1"	01/06/95	A.64	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2"	02/06/95	A.65	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	02/06/95	A.66	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
4ª	1"	08/06/95	A.67	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2"	09/06/95	A.68	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	09/06/95	A.69	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
5ª	1"	14/06/95	A.70	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2"	15/06/95	A.71	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	15/06/95	A.72	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
6ª	1"	21/06/95	A.73	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2"	22/06/95	A.74	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$
	2" ^{1/2}	22/06/95	A.75	32,00	$0,772 \times 10^{-3}$

quadro 27 – Elementos sobre os estudos hidrodinâmicos realizados na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Tubagem	Experiência	Número de medições	Desvio Padrão (na determinação da perda de carga)			Erro médio (% do valor medido)
			valor máximo	valor mínimo	valor médio	
1"	1ª	24	0,879	0,056	0,299	0,17
	2ª	36	2,169	0,010	0,451	0,30
	3ª	32	22,090	0,030	0,700	1,92
	4ª	39	2,156	0,057	0,507	0,57
	5ª	35	3,006	0,031	0,535	0,43
	6ª	38	9,137	0,057	0,926	0,86
2"	1ª	29	1,517	0,029	0,496	1,53
	2ª	33	0,222	0,036	0,098	0,39
	3ª	35	1,930	0,056	0,255	2,11
	4ª	37	0,637	0,061	0,156	1,92
	5ª	33	0,258	0,052	0,090	1,35
	6ª	66	0,232	0,055	0,087	1,53
2"1/2	1ª	27	0,852	0,010	0,238	1,36
	2ª	21	0,238	0,006	0,076	0,65
	3ª	44	0,368	0,049	0,104	1,63
	4ª	35	0,446	0,061	0,099	2,33
	5ª	33	0,361	0,060	0,090	2,54
	6ª	36	0,507	0,063	0,134	4,01

quadro 28 – Elementos estatísticos referentes aos estudos hidrodinâmicos realizados na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Pelas razões já apontadas em 7.3.1. optou-se, nesta série de experiências, por efectuar um número de medições por experiência muito inferior às realizadas nas experiências com lamas digeridas.

Por último, durante a segunda série de experiências com lamas em digestão anaeróbia realizaram-se, ainda, os estudos granulométricos apresentados no *quadro 29* e nas *figuras C.34 a C.51* do Anexo C.

Dia do ensaio	Experiência	Figura n°	Diâmetro médio (μm)	C_u	C_c
18/05/95	1.1	C.34	39,85	5,0	1,29
	1.2	C.35	39,63		
25/05/95	2.1	C.37	38,46	4,5	1,23
	2.2	C.38	38,34		
01/06/95	3.1	C.40	26,78	6,4	1,33
	3.2	C.41	26,48		
08/06/95	4.1	C.43	21,55	5,8	1,17
	4.2	C.44	21,09		
14/06/95	5.1	C.46	20,64	5,4	1,07
	5.2	C.47	21,22		
21/06/95	6.1	C.49	18,57	4,9	1,03
	6.2	C.50	18,01		

quadro 22 – Resultados obtidos nos estudos granulométricos realizados na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Tal como nos estudos granulométricos efectuados em 7.3.1., também estes podem ter sido afectados pela adição de cal às lamas, destinada a corrigir o valor do seu pH.

Os estudos granulométricos realizados revelam algumas diferenças relativamente aos anteriores. Assim, embora o diâmetro médio inicial das partículas sólidas (lamas brutas espessadas) seja muito parecido com o das lamas anteriormente experimentadas, verifica-se que ocorreu uma brusca diminuição no diâmetro médio das partículas entre a segunda e a terceira semana de ensaios, traduzido por uma redução do diâmetro médio de 38,4 μm para 26,6 μm . Este facto só pode ser devido a um desgaste significativo das partículas motivado, em princípio, pela existência de partículas sólidas mais frágeis.

Esta redução brusca do diâmetro médio das partículas, repercutiu-se na evolução registada no coeficiente de uniformidade que apresentou uma evolução mais variável, entre um valor inicial de 5,0 e um valor final de 4,9 mas atingindo, a meio das experiências, um máximo de 6,4. No entanto, globalmente, as partículas sólidas podem continuar a ser classificadas como mal graduadas, ou seja, bastante uniformes.

Apresenta-se, na *figura 115*, a evolução do diâmetro médio das partículas sólidas durante esta série de experiências.

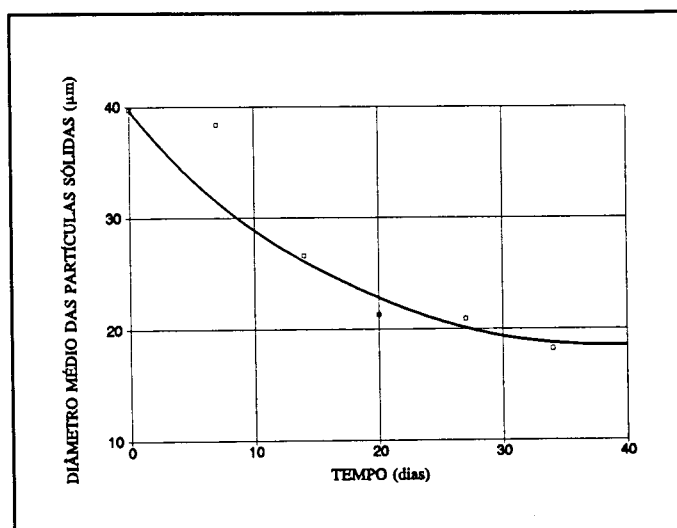


figura 115 – Evolução do diâmetro médio das partículas sólidas na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Verifica-se, assim, que o diâmetro médio das partículas sólidas sofreu uma redução global de cerca de 54%, valor bastante superior ao ocorrido nas experiências anteriores. Esta ocorrência ficou sobretudo ligada à drástica redução ocorrida entre a segunda e a terceira semana de experiências onde se verificou uma redução de cerca de 30% do diâmetro médio.

7.3.2.1. Análise dos Resultados Obtidos

Os resultados obtidos nas análises à concentração de sólidos nas lamas revelam que as lamas brutas espessadas recolhidas apresentam uma concentração de sólidos totais de 3,9%, ou seja, dentro dos valores considerados normais de acordo com o critério indicado no *quadro 4* do *Capítulo 3*, que era de 3 a 6%. Mantém-se, no entanto, a tendência para que a percentagem em sólidos voláteis existente nas lamas (77,4%) seja superior ao limite máximo previsto (70%).

Mantém-se, também, a evolução apresentada em 7.3.1. para os sólidos voláteis, que sofrem uma redução de 7,4% durante o processo de digestão anaeróbia, atingindo, após a digestão, uma percentagem de 70% o que confirma os resultados obtidos anteriormente.

Verifica-se, ainda, que a taxa de produção de biogás mantém valores aproximadamente idênticos aos da experiência anterior, o que significa que o processo de digestão anaeróbia desenvolvido no reator assume características bastante estáveis.

Relativamente aos estudos reológicos, verificou-se que o modelo que melhor se ajusta ao comportamento reológico exibido pela lama é o modelo de *Herschell–Bulkley*.

Apresenta-se, nas *figuras 116, 117 e 118*, a evolução verificada, ao longo do processo de digestão da lama, nos três parâmetros reológicos do modelo de *Herschell–Bulkley*, respectivamente, *tensão de cedência*, *coeficiente de consistência* e *índice de potência*.

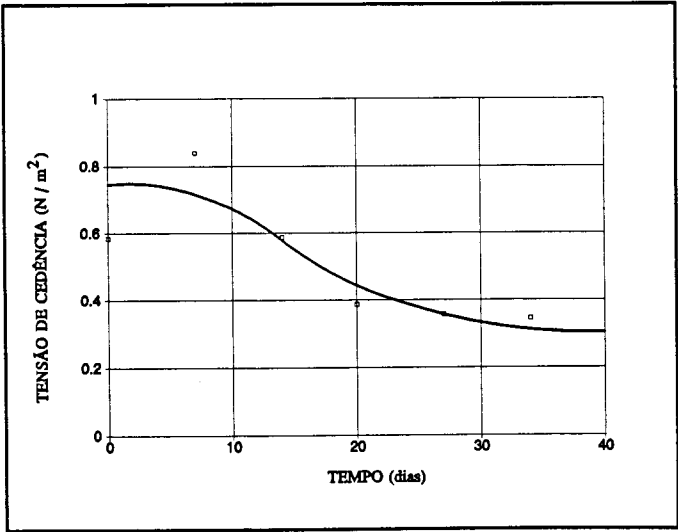


figura 116 – Evolução da tensão de cedência, na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

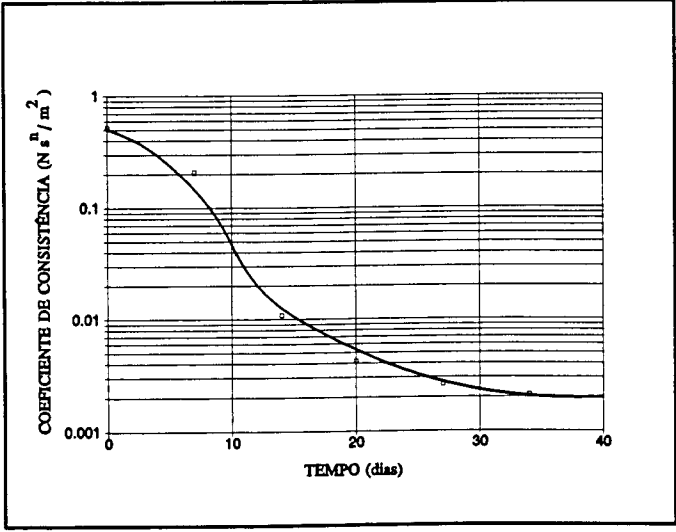


figura 117 – Evolução do coeficiente de consistência, na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

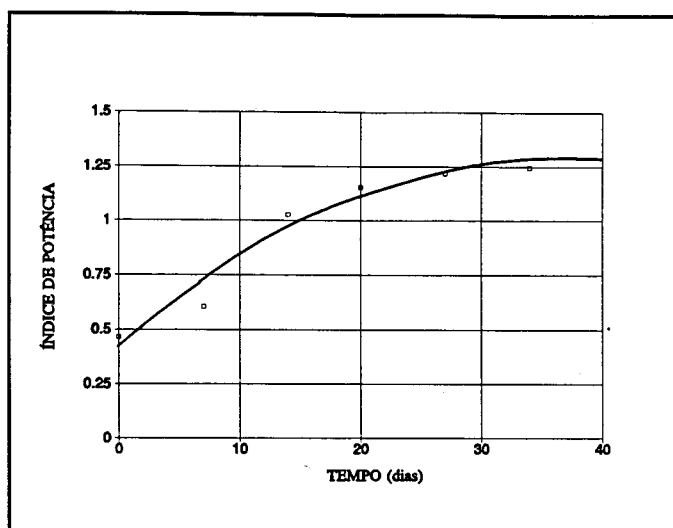


figura 118 – Evolução do índice de potência, na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Tal como em 7.3.1., os parâmetros reológicos sofrem uma variação muito significativa ao longo do processo de digestão anaeróbia da lama. Verifica-se, também, que os valores desses parâmetros, tanto para a lama bruta espessada como para a lama digerida não apresentam diferenças muito relevantes em relação à 1ª série de experiências, se atendermos à variação que ocorreu no teor de sólidos da lama.

Apresenta-se, no **quadro 30**, uma comparação das características reológicas das lamas analisadas na primeira e na segunda série de experiências com lamas em digestão anaeróbia, verificadas quer no início quer no fim do processo de digestão.

Parâmetro	Lama Bruta Espessada		Lama Digerida	
	1ª Série de Experiências	2ª Série de Experiências	1ª Série de Experiências	2ª Série de Experiências
Tensão de Cedência, τ_c (N/m ²)	0,680	0,585	0,277	0,345
Coefficiente de Consistência, K (Ns ⁿ /m ²)	0,352	0,526	0,0024	0,0021
Índice de Potência, n	0,470	0,465	1,230	1,247

quadro 30 – Variação dos parâmetros reológicos, durante o processo de digestão, na 1ª e 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Embora os resultados apresentem algumas semelhanças, distinguem-se os valores obtidos para o *coeficiente de consistência* das lamas brutas espessadas que apresentam uma acentuada diferença da primeira para a segunda série de experiências. Este facto deve-se, em princípio, ao aumento da concentração de sólidos na lama, verificando-se, assim, que na lama bruta espessada, o aumento da concentração de sólidos afecta, sobretudo, o valor do *coeficiente de consistência*.

Por sua vez, nas lamas digeridas as variações ocorridas nos valores dos diferentes parâmetros não podem considerar-se significativas, considerando-se, por isso, as características reológicas desta lama menos dependentes da concentração de sólidos na gama de concentrações estudada.

Tal como em 7.3.1., apresenta-se, ainda, nas *figuras B.42, B.48, B.54, B.60, B.66 e B.72*, do Anexo B, a variação da viscosidade das lamas com o valor da velocidade de deformação angular, em cada um dos ensaios reológicos realizados.

Confirma-se, assim, que o transporte de lamas digeridas em condutas sob pressão, realiza-se muito mais facilmente que o transporte de lamas brutas espessadas.

Seguindo a mesma metodologia indicada nas séries de experiências anteriormente efectuadas, apresenta-se, agora, nas *figuras 119 a 124*, num sistema de eixos adimensional (Re_g, λ), o resultado da aplicação do modelo reológico de *Herschell-Bulkley*, previsto a partir dos estudos reológicos, aos resultados obtidos nos estudos hidrodinâmicos.

Verifica-se, assim, que, nesta série de experiências, os resultados obtidos nos estudos hidrodinâmicos também se ajustam bastante bem ao comportamento reológico previsto para a lama.

Confirma-se, também, que na instalação experimental o escoamento das lamas ocorre quase sempre em regime laminar, atingindo-se, apenas, o regime turbulento na fase final do processo de digestão e na conduta de 1". Por este motivo, não se considera possível a verificação rigorosa das condições de aplicabilidade das fórmulas de resistência em regime turbulento.

A transição do regime laminar para o turbulento ocorre para números de *Reynolds* generalizados da ordem dos 2000 não se detetando, assim, um retardamento da passagem para regime turbulento devido à existência de *tensão de cedência*.

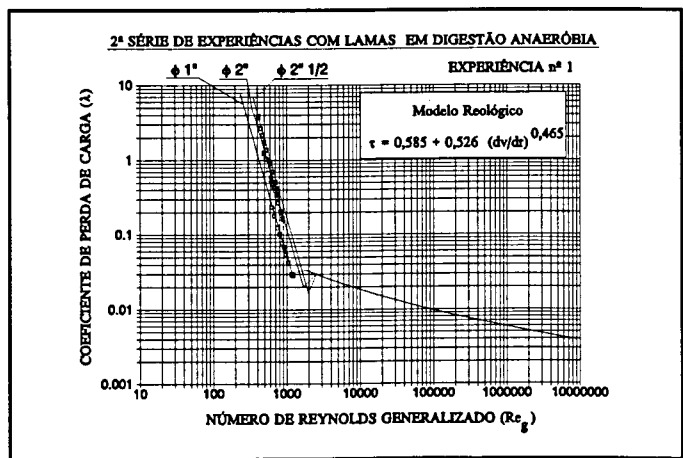


figura 119 – Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 1ª experiência da 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

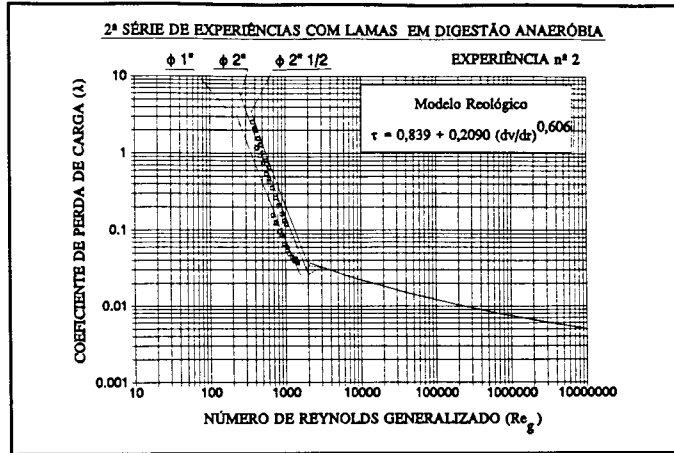


figura 120 – Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 2ª experiência da 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

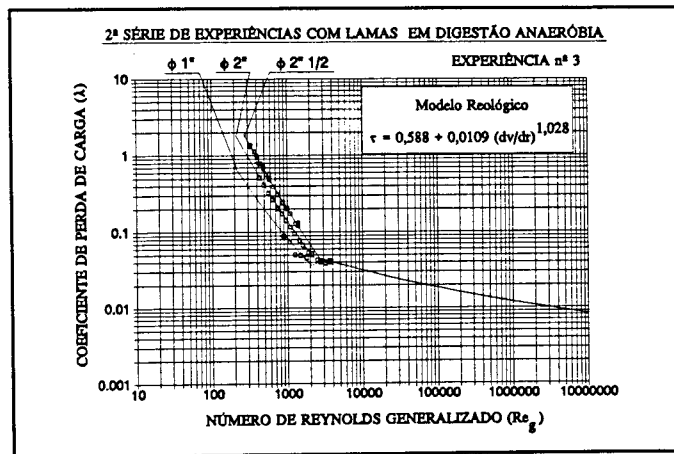


figura 121 – Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 3ª experiência da 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

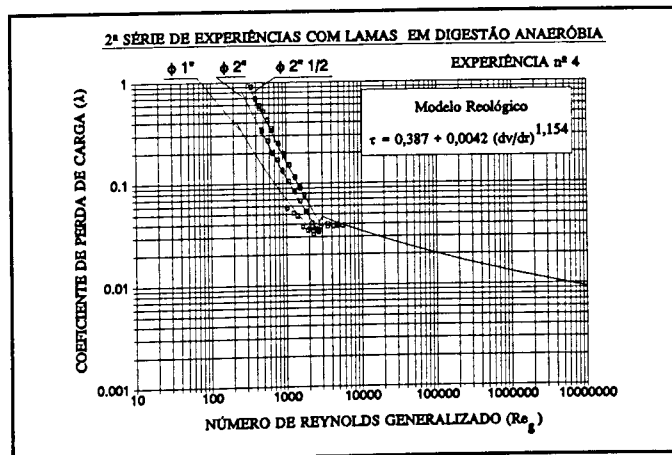


figura 122 – Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 4ª experiência da 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

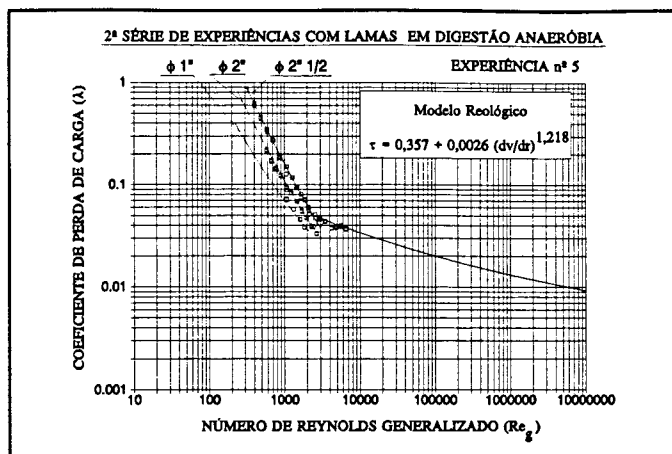


figura 123 – Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 5ª experiência da 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

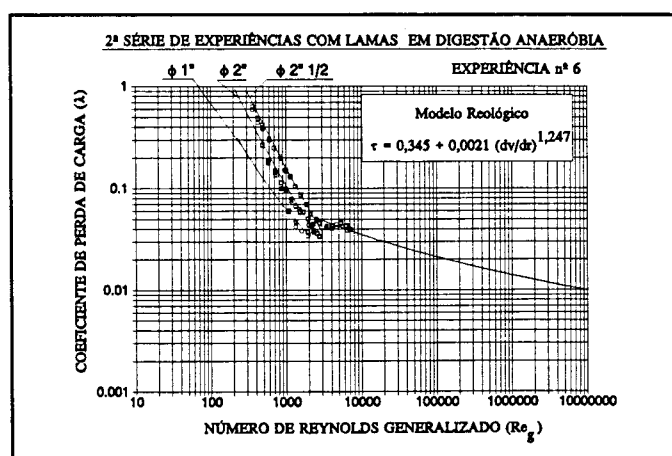


figura 124 – Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 6ª experiência da 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.

Apresenta-se, também, na **figura 125**, em regime turbulento e para os dois comportamentos reológicos limites, referentes, respectivamente, à experiência nº 1 e à experiência nº 6, a relação entre o número de *Reynolds* generalizado e o coeficiente de proporcionalidade que traduz a razão entre os coeficientes de perda de carga para fluidos com um comportamento reológico desse tipo e fluidos *Newtonianos*.

Por último, os resultados obtidos nos estudos granulométricos permitem concluir que o diâmetro médio das lamas brutas espessadas mantém-se na gama dos 30 μm aos 40 μm .

No entanto, verificou-se a ocorrência de um acentuado desgaste das partículas sólidas durante os testes, pelo que o diâmetro médio da lama digerida no final desta série de experiências foi inferior ao obtido nas experiências anteriores.

Em termos de classificação granulométrica, as partículas sólidas da lama mantêm a classificação de mal graduadas, isto é, uniformes.

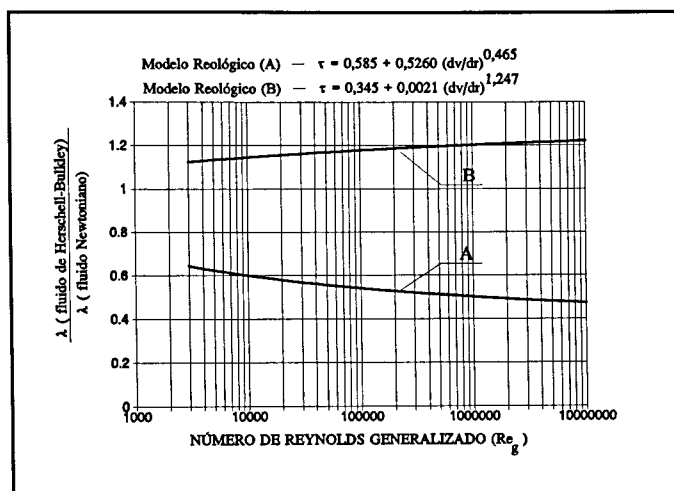


figura 125 – Limites para a relação entre os coeficientes de perda de carga das lamelas e de um fluido Newtoniano obtidos na 2ª série de experiências com lamelas em digestão anaeróbia.

No final desta segunda série de experiências com lamelas em digestão anaeróbia confirmam-se as conclusões estabelecidas em 7.3.1., acrescentando-se as seguintes:

- O aumento verificado na concentração em sólidos não alterou significativamente a caracterização reológica da lama digerida e, em relação à lama bruta espessada, teve, apenas, alguma interferência sobre o *coeficiente de consistência*.
- Verificou-se um acentuado desgaste das partículas sólidas, muito superior ao verificado em todas as experiências antecedentes.

7.4. COMENTÁRIOS FINAIS E COMPARAÇÃO COM OS ESTUDOS ANTECEDENTES

Importa, por último, realizar uma análise comparativa entre os resultados obtidos nos estudos experimentais anteriormente descritos e os propostos nos estudos antecedentes.

Apresenta-se, então, no *quadro 31*, uma comparação entre os valores propostos para os parâmetros reológicos nos estudos efectuados e os propostos por *Frost* [27], correspondentes, respectivamente, à gama máxima e mínima dos valores propostos.

Por, sua vez, admitindo um comportamento reológico do tipo plástico de *Bingham*, apresenta-se, no *quadro 32*, uma comparação dos resultados obtidos com os propostos por *Mulbarger et al.* [55].

PARÂMETRO	ESTUDOS EXPERIMENTAIS				FROST [27]			
	Lamas Brutas		Lamas Digeridas		Lamas Brutas		Lamas Digeridas	
	3%	4%	2%	3%	3%	4%	2%	3%
Tensão de Cedência, τ_c (N/m ²)	0,650		0,300		0,942 2,690	2,169 6,196	0,124 0,339	0,485 1,331
Coefficiente de Consistência, K (Ns ⁿ /m ²)	0,350	0,525	0,0023		0,151 1,728	0,358 4,096	0,019 0,215	0,080 0,887
Índice de Potência, n	0,470		1,23	1,25	0,449 0,417	0,426 0,396	0,511 0,474	0,468 0,435

quadro 31 – Comparação entre os valores dos parâmetros do modelo reológico de Herschell–Bulkley obtidos nos estudos experimentais e os limites máximo e mínimo propostos por Frost [27].

PARÂMETRO	ESTUDOS EXPERIMENTAIS				MULBARGER et al [55]	
	Lamas Brutas		Lamas Digeridas		Lamas	
	3%	4%	2%	3%	2%	4%
Tensão de Cedência, τ_c (N/m ²)	1,150	1,550	0,200	0,260	0,7 2,0	4,0 9,0
Coefficiente de Rigidez, η_B (Ns/m ²)	0,018		0,01		0,003 0,008	0,008 0,02

quadro 32 – Comparação entre os valores dos parâmetros do modelo reológico plástico de Bingham obtidos nos estudos experimentais e os limites máximo e mínimo propostos por Mulbarger et al [55].

Com base nos valores apresentados nos **quadros 31 e 32** é possível concluir-se que os resultados obtidos para as lamas brutas podem situar-se dentro dos limites propostos por *Frost* e *Mulbarger* mas, em relação às lamas digeridas, os valores propostos por *Frost*, são muito diferentes dos obtidos nos ensaios efectuados, particularmente em relação aos parâmetros *coeficiente de consistência* e *índice de potência*. Por último, os limites propostos por *Mulbarger* para os valores dos parâmetros reológicos das lamas digeridas abrangem, também, os resultados obtidos nos ensaios efectuados.

Refere-se, no entanto, dois aspectos que se consideram importantes:

- As gamas de valores propostos nos estudos antecedentes referidos são, em geral, bastante alargadas e podem estar na origem de erros significativos na definição dos valores mais prováveis para os diferentes parâmetros reológicos.
- Nos estudos efectuados por *Frost* o *índice de potência* mantém-se sempre entre gamas de valores bastante apertadas, tanto para as lamas brutas como para as lamas digeridas e é, mesmo, na gama de concentrações estudada, praticamente independente da concentração em sólidos existente. Durante as experiências realizadas verificou-se que o *índice de potência* das lamas apresentava uma elevada alteração durante o processo de digestão anaeróbia que não está minimamente de acordo com os resultados apresentados por este autor.

8. CONCLUSÕES

No final da presente Dissertação é possível retirar as seguintes conclusões:

1. A metodologia seguida na fase experimental da presente Dissertação é inovadora, pois permitiu, pela primeira vez, associar, num estudo experimental, o processo biológico de digestão anaeróbia das lamas com aprofundados estudos reológicos, hidrodinâmicos e granulométricos. A associação de todos estes parâmetros permitiu, assim, compreender as relações que se estabelecem entre eles e, também, compreender melhor os mecanismos subjacentes ao transporte das lamas em condutas sob pressão.
2. As lamas existentes numa ETAR sofrem uma grande alteração durante o processo de digestão biológica anaeróbia que se traduz, na prática, na redução da concentração de sólidos voláteis existentes na lama. Este fenómeno é acompanhado por alterações igualmente significativas nas características reológicas da lama cuja evolução temporal ao longo do processo de digestão está relacionada com o ritmo a que se processa a biodegradação da matéria orgânica existente.
3. Nas lamas estudadas verificou-se que a concentração em matéria orgânica, traduzida pela percentagem de sólidos voláteis, apresenta, sempre, valores bastante superiores aos sugeridos na bibliografia, sendo de cerca de 80% e 70%, respectivamente, para as lamas brutas e para as lamas digeridas.
4. Os resultados obtidos indiciam que durante o processo de digestão anaeróbia apenas os sólidos orgânicos de muito pequenas dimensões (dissolvidos e coloidais) são assimilados biologicamente. Os restantes sólidos orgânicos (com diâmetro médio superior a 1 μm) mantêm-se praticamente inalterados.
5. Contrariamente a todas as informações disponíveis na bibliografia, que referem as lamas como materiais extremamente heterogéneos em particular no que diz respeito às suas propriedades reológicas e comportamento hidrodinâmico, a presente Dissertação demonstra que as lamas são, normalmente, em média, fluidos bastante homogéneos. Esta conclusão é confirmada pelas características exibidas pelas lamas tanto em termos de concentração em sólidos, como nas suas características reológicas, hidrodinâmicas e granulométricas.
6. O modelo reológico que melhor traduz o comportamento reológico das lamas, independentemente do nível de estabilização biológica atingido, é o modelo de *Herschell-Bulkley*. Verificou-se, ainda, que na gama de concentrações de sólidos abrangida pelo estudo, os valores previstos para os diferentes parâmetros reológicos dependem muito mais do tipo de lamas (brutas ou digeridas) do que da concentração em sólidos existente.

7. Atendendo a que o mecanismo de assimilação biológica da matéria orgânica incidiu fundamentalmente sobre as partículas sólidas de muito pequena dimensão, conclui-se que estes sólidos (coloidais e dissolvidos) assumem uma grande importância na caracterização do comportamento reológico da lama. O mecanismo utilizado por estas substâncias para influenciar as características reológicas das lamas não foi estudado mas pode ocorrer por duas formas. A primeira consiste em considerá-las como macromoléculas orgânicas existentes na fase líquida e concluir, assim, que as características reológicas da fase líquida são profundamente alteradas devido à remoção destes compostos. A segunda forma consiste em admitir que estas substâncias associam-se às partículas sólidas existentes nas lamas formando ligações entre partículas que estão na origem de uma determinada "estrutura interna" em que os sólidos coloidais e dissolvidos são os elos de ligação.
8. No âmbito do presente estudo, não foi possível realizar uma análise suficientemente aprofundada das características do escoamento em regime turbulento. No entanto, na gama estudada de números de *Reynolds* generalizados, que corresponde, em regime turbulento, à sua fase inicial, verificou-se que a fórmula de *Dodge e Metzner* ajusta-se razoavelmente aos resultados obtidos. Este facto, significa que o parâmetro reológico, tensão de cedência, apenas interfere nas condições de escoamento das lamas quando o regime do escoamento é laminar.
9. Verificou-se, também, que a transição do regime laminar para o turbulento ocorre sempre para uma gama de valores do número de *Reynolds* generalizado bastante próxima de 3 000. Significa, isto, que os valores da tensão de cedência, na gama de concentrações em sólidos estudada, nunca foi suficientemente elevada para retardar a transição do regime laminar para o turbulento.
10. Conclui-se, também, que quando existe necessidade de realizar o transporte a médias ou grandes distâncias das lamas é preferível realizar esse transporte no final do processo de digestão anaeróbia. Com efeito, analisando os *quadros 31 e 32*, conclui-se que as lamas digeridas apresentam características reológicas muito mais favoráveis ao transporte em condutas pois permitem uma redução extremamente significativa no valor da perda de carga unitária do escoamento.
11. As lamas apresentam características granulométricas muito estáveis ao longo do processo de digestão anaeróbia. Com efeito, nas experiências realizadas, apesar de se ter verificado sempre uma redução do diâmetro médio das partículas sólidas ao longo do tempo, essa redução não é atribuída ao processo de digestão anaeróbia existente mas, antes, à passagem das lamas pela instalação destinada aos estudos hidrodinâmicos e, em particular, pela "mohno"-bomba.

12. Nas aplicações práticas de engenharia sugerem-se as seguintes metodologias para cálculo das perdas de carga nas condutas de transporte de lamas de ETAR's, quando a sua concentração em sólidos é inferior a 4%:

- Regime laminar ($Re_g < 3000$):

Sabendo que $j = \Delta P / \gamma L$, aplica-se a equação (115) (fórmula de resistência para fluidos de *Herschell-Bulkley*), considerando os parâmetros reológicos indicados no *quadro 31*.

Método simplificado: Aplica-se a equação (109) (fórmula de resistência para fluidos plásticos de *Bingham*), considerando os parâmetros reológicos indicados no *quadro 32*.

- Regime turbulento ($Re_g > 3000$):

1) regime turbulento liso

Determina-se o coeficiente de perda de carga, λ , a partir da equação (208) (fórmula de *Dodge e Metzner*), considerando os valores dos parâmetros reológicos indicados no *quadro 31*.

2) regime de transição liso-rugoso e turbulento rugoso

Determina-se o coeficiente K_λ a partir das equações (270) e (263) aplicáveis, respectivamente, ao regime de transição liso-rugoso e ao regime turbulento rugoso de fluidos *Newtonianos* e, em seguida, determina-se o coeficiente de perda de carga, λ , pela multiplicação desse coeficiente com o valor do coeficiente de perda de carga em regime turbulento liso da lama, equação (208) (fórmula de *Dodge e Metzner*), considerando os valores dos parâmetros reológicos indicados no *quadro 31*.

Após a presente Dissertação surgem, naturalmente, novas perspectivas para trabalhos futuros que permitam dar continuidade aos estudos agora realizados. Apresentam-se, em seguida, algumas sugestões nesse sentido:

1. Estudo do escoamento das lamas em regime turbulento numa gama bastante mais vasta de números de *Reynolds* generalizados, tendo em vista a formulação da metodologia mais correcta para determinação das perdas de carga em regime turbulento liso e rugoso.
2. Caracterização, utilizando simulação com fluidos com características reológicas adequadas e recorrendo, eventualmente, a técnicas de LDA (Anemometria Laser Doppler) para caracterização dos campos de velocidades e de pressões existentes nos escoamentos das lamas em condutas sob pressão.
3. Estudo da distribuição da concentração em sólidos no escoamento de lamas em condutas horizontais com recurso a técnicas de tomografia.
4. Estudos de aditivos que permitam melhorar as características de transporte das lamas em condutas sob pressão, alterando o seu comportamento reológico de modo a permitir a redução da dissipação de energia associada ao escoamento.
5. Estudo de aditivos que permitam melhorar as características de desidratação das lamas permitindo a separação mais rápida, eficaz e com menores custos da "*bound water*".

BIBLIOGRAFIA

- [1] AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOC. – *Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater*. 16th Ed. Washington, D.C., 1985.
- [2] ASTARITA, G. – *The Engineering Reality of the Yield Stress (letter to the editor)*. "J. Rheology", 1990, vol. 34, pág. 275.
- [3] ASTARITA, G.; MARRUCCI, G. – *Principles of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. Inglaterra: Mc Graw-Hill Book Company Limited, 1974.
- [4] COX, R.G.; MASON, S.G. – *Suspended Particles in Fluid Flow Through Tubes*. Montreal: Pulp and Paper Research Institute of Canada, and Department of Chemistry, Mc-Gill University, 1971.
- [5] BARNES, H.A. – *A Review of the Slip (wall depletion) of Polymer Solutions, Emulsions and Particle Suspensions in Viscometers: its Cause, Character, and Cure*. "J. Non-Newtonian Fluid Mechanics", 1995, vol. 56, pág. 221–251.
- [6] BARNES, H.A.; HUTTON, J.F. – *An Introduction to Rheology*. Elsevier Science Publishers, 1989.
- [7] BARNES, H.A.; WALTERS K. – *The Yield Stress Myth?*. "Rheologica Acta", 1985, vol. 24, pág. 323–326.
- [8] BATCHELOR, G.K. – *The Stress System in a Suspension of Force-Free Particles*. "J. Fluid Mechanics", 1970, vol. 41, part 3, pág. 545–570.
- [9] BOGER, D.V. – *Rheology of Suspensions*. Advanced Mineral Products Res. Centre, Univ. Melbourne.
- [10] BOGER, D.V. – *Yield Stress Measurement*. Lecture Series 1994–03, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, 1994.
- [11] BRENNER, H. – *Rheology of Two-Phase Systems*. "Annual Review of Fluid Mechanics", 1970, vol. 2, pág. 137–176.
- [12] BROWN, N.P.; HEYWOOD, N.I. – *Slurry Handling – Design of Solid-Liquid Systems*. London and New York, Elsevier Applied Science: 1991.
- [13] BUNCH R.L., BARTH E.F., ETTINGER M.B. – *Organic Materials in Secondary Effluent*. "Journal WPCF", 1961, vol. 33, pág. 122–126.

- [14] CHENG, D.C-H.; HEYWOOD, N.I. – *Viscometric Testing and Head Loss Correlations for Pipeline Design for Fibrous Suspensions*. Warren Spring Laboratory, LR 502 (MH) M.
- [15] CHRISTENSEN, R. M. – *Theory of viscoelasticity. An Introduction*. 2^a ed., New York. Academic Press. Inc, 1982.
- [16] CHURCHILL, S.W. – *Viscous Flows. The Practical Use of Theory*. Stoneham: Butterworth Publishers, 1988.
- [17] COUSSOT, P; BOYER, S. – *Determination of Yield Stress Fluid Behavior from Inclined Plane Test*. "Rheologica Acta", 1995, vol. 34, pág. 534–543.
- [18] DABAK T., YUCEL O. – *Shear Viscosity Behavior of Highly Concentrated Suspensions at Low and High Shear Rates*. "Rheologica Acta", 1986, vol. 25, pág. 527–533.
- [19] DEGRÈMONT – *Water Treatment Handbook*. 5^a Ed. 1984.
- [20] DELIME, A.; MOAN, M. – *Lateral Migrations of Solid Spheres in Tube Flow*. "Rheologica Acta", 1991, vol. 30, pág. 131–139.
- [21] DOEBELIN, E.O. – *Measurement Systems: Application and Design*. New York: Mc Graw–Hill, 1966.
- [22] ECKSTEIN, E.C.; BAILEY, D.G.; SAPHIRO, A.H. – *Self Diffusion of Particles in Shear Flow of a Suspension*. "J. Fluid Mechanics", 1977, vol. 79, pág. 191.
- [23] FEYO DE AZEVEDO, S.; LEITÃO, P.A. – *Sistemas de Aquisição Remota de Dados*. (Relatório interno). Porto: Departamento de Química da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1987.
- [24] FRANKEL, N.A., ACRIVOS A. – *On the Viscosity of a Concentrated Suspension of Solid Spheres*. "Chemical Engineering Science", 1967, vol. 22, pág. 847–853.
- [25] FRANKLIN, R.E.; WALLACE, J.M. – *Absolute Measurements of Static–Hole Error Using Flush Transducers*. "Journal of Fluid Mechanics", 1970, vol. 42, Part 1, pág. 33–48.
- [26] FROST, R. C. – *Prediction of Friction Losses for the Flow of Sewage Sludges in Straight Pipes*. "Technical Report TR 175", Water Research Centre, Jan. 1982.
- [27] FROST, R. C. – *How to Design Sewage Sludge Pumping Systems*. "Technical Report TR 185", Water Research Centre, Jan. 1983.

- [28] GADALA-MARIA, F.; ACRIVOS, A. – *Shear Induced Structure in a Concentrated Suspension of Solid Spheres*. "J. Rheology", 1980, vol. 24, pág. 799.
- [29] GOVIER, G.W. & AZIZ, K. – *The Flow of Complex Mixtures in Pipes*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- [30] HANKS, R.W.; DADIA, B.H. – *Theoretical Analysis of Turbulent Flow of Non-Newtonian Slurries in Pipes*. "AIChE. Journal", 1971, vol. 17, pág. 554–557.
- [31] HARTNETT, J.P., HU, R.Y.Z. – *The Yield Stress – an Engineering Reality*, "J. Rheology", 1989, vol. 33, pág. 671.
- [32] HERWIJN, A.J.M. – *The Solid-Water Bound Strength in Sewage Sludge*. "AIChE. Annual Meeting", Miami Beach, Fla., 1992, pág. 1073
- [33] HEYWOOD, N.I., CHENG D.C.-H. – *Comparison of Methods for Predicting Head Loss in Turbulent Pipe Flow of Non-Newtonian Fluids*. "Trans. Inst. Meas. & Control", 1984, vol. 6, pág. 33.
- [34] HIGHGATE, D.J., WHORLOW, R.W. – *End Effects and Particle Migration Effects in Concentric Cylinder Rheometry*, "Rheologica Acta", 1969, vol. 8, pág. 142.
- [35] HUNTER J.V.; HEUKELEKIAN H. – *The Composition of Domestic Sewage Fractions*. "Journal WPCF", 1965, vol. 37, pág. 1142–1163.
- [36] JASTRZEBSKI, Z.D. – *Entrance Effects and Wall Effects in an Extrusion Rheometer During the Flow of Concentrated Suspensions*. "Ind. Eng. Chem. Fundamentals", 1967, vol. 6, pág. 445–454.
- [37] JEFFREY, D.Y., ACRIVOS, A. – *The Rheological Properties of Suspensions of Rigid Particles*. "AIChE. Journal", 1976, vol. 22, nº 3, pág. 417–432.
- [38] JONES, D.A.R., LEARY, B., BOGER, D.V. – *The Rheology of a Concentrated Colloidal Suspension of Hard Spheres*. "J. Colloidal Int. Sci.", 1991, vol. 147, pág. 479.
- [39] JOHNSON, M. – *First Report on the WRC Sewage Sludge Pumping Project*. "Technical Report TR 162", Water Research Centre, 1981.
- [40] KATSIRIS N., KOUZILI-KATSIRI, A. – *Bound Water Content of Biological Sludges in Relation to Filtration and Dewatering*. "Water Research", 1987, vol. 21, pág. 1319.
- [41] KRIEGER, I.M., DOUGHERTY T.J. – *A Mechanism for Non-Newtonian Flow in Suspensions of Rigid Spheres*. "Trans. Soc. Rheo.", 1959, vol. 3, pág. 137–152.

- [42] KRIEGER, I.M.; MARON, S.N – *Direct Determination of the Flow Curves of non-Newtonian Fluids III. Standardize al Treatment of Viscometric Data*. "J. Applied Physics.", 1954, vol. 25, pág. 72–75.
- [43] LEBARON BOWEN Jr, R. – *How to Handle Slurries*. "Chemical Engineering", Ag. 1961, pág. 129–132.
- [44] LEE, D.J.; HSU, Y.H. – *Measurement of Bound Water in Sludges: A Comparative Study*. Water Environment Research, 1995, vol. 67, nº 3, pág. 310–317.
- [45] LEIGHTON, D.; ACRIVOS, A. – *The Shear Induced Migration of Particles in Concentrated Suspensions*. "J. Fluid Mechanics", 1987, vol. 181, pág. 415–439.
- [46] LENCASTRE, A. – *Hidráulica Geral*. Lisboa: Hidroprojecto, 1983.
- [47] LEVINE, A.D.; TCHOBANOGLOUS G.; ASANO T. – *Characterization of The Size Distribution of Contaminants in Wastewater: Treatment and Reuse Implications*. "Journal WPCF", 1985, vol 57, nº 7, pág. 805–816.
- [48] LODES, A.; MIERKA, O. – *Distribution of Eddy Viscosity and Mixing Lenght in a non Newtonian Flow of a Solid Particle–Gas Suspension*. "Rheologica Acta", 1986, vol. 25 (6), pág. 632–637.
- [49] LUMLEY, J. L. – *Drag Reduction in Two Phase and Polymer Flows. The Physics of Fluids*. Out. 1977, vol. 20 (10), pág. 564–571.
- [50] MAIA, R. – *Investigações Numéricas e Experimentais do Efeito das Perdas de Carga Localizadas em sistemas de Tubagens. Métodos e Técnicas para o seu Estudo Sistemático – o Caso Particular do Tê a 90°*. Porto: Faculdade de Engenharia, Tese de Doutoramento, 1992.
- [51] METCALF & EDDY, INC. – *Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse*. 3ª Ed. New York: McGraw–Hill Book Co., 1991.
- [52] MONTEIRO, P. – *Perdas de Energia em Conduatas sob Pressão para Transporte de Lamas de Esgoto*. Porto: Faculdade de Engenharia, Tese de Mestrado, 1991.
- [53] MONTEIRO, P.; TENTUGAL–VALENTE, J. – *Escoamentos em Conduatas Sob Pressão de Lamas Produzidas em ETAR's*. "5º Encontro Nacional de Saneamento Básico", 1991.
- [54] MONTEIRO, P.; TENTUGAL–VALENTE, J. – *Flow Characteristics of Anaerobic Digesting Sludges*. Comunicação admitida à "Hydrotransport 13 – Slurry Handling and Pipeline Transport", 1996.

- [55] MONTEIRO, P. – *Fórmulas de Resistência para Escoamentos sob Pressão de Lamas Produzidas em ETAR's*. "Revista Recursos Hídricos", 1992, vol. 12, nº 3.
- [55] MULBARGER, M.C.; COPAS, S.R.; KORDIC, J.R.; CASH, F.M. – *Pipeline Friction Losses for Wastewater Sludges*. "Journal WPCF", 1981, vol. 51, nº 8.
- [56] NGUYEN, Q.D., BOGER, D.V. – *Characterization of Yield Stress Fluids Using Concentric Cylinder Viscometry*. "Rheologica Acta", 1987, vol. 26, pág. 508.
- [57] NGUYEN, Q.D., BOGER, D.V. – *Direct Yield Stress Measurement with the Vane Method*. "J. Rheology", 1985, vol. 29, pág. 335.
- [58] NGUYEN, Q.D., BOGER, D.V. – *Measuring the Flow Properties of Yield Stress Fluids*. "Annual Review of Fluid Mechanics", 1992, vol. 24, pág. 47–88.
- [59] NOURI, J.M., WHITELAW, J.H., YIANNESKIS, M. – *Particle Motion and Turbulence in Dense Two-Phase Flows*. "Int. J. Multiphase Flow", 1987, vol. 13, nº 6, pág. 729–739.
- [60] NOVAIS-BARBOSA, J. – *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral*. Porto: Porto Editora L^{da}, 1985.
- [61] OTSUBO Y.; WATANABE K. – *Rheological Behavior of Silica Suspensions Floculated by Bridging*. "Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics", 1987, vol. 24, pág. 265–278.
- [62] PAPENHUIJZEN, J.M.P. – *The Role of Particle Interactions in the Rheology of Dispersed Systems*. "Rheologica Acta", 1972, vol. 11, pág. 73.
- [63] PARK, J. T.; MANNHEIMER, R.J.; GRIMLEY, T. A.; MORRAW, T. B. – *Pipe Flow Measurements of a Transparent Non-Newtonian Slurry*. "Journal of Fluid Engineering", Set. 1989, vol 111, pág. 331–336.
- [64] PIRIH, R. J.; SWANDSON, W. M. – *Drag Reduction and Turbulence Modification in Particle Suspensions*. "The Canadian Journal of Chemical Engineering", 1972, vol. 50, pág. 221–227.
- [65] PRINCEN, H.M. – *A Novel Design to Eliminate End Effects in a Concentric Cylinder Viscometer*. "J. Rheology", 1986, vol. 30, pág. 271.
- [66] QUADER, A. K. M. A.; WILKINSON, W. L. – *Correlation of Turbulent Flow Rate Pressure Drop Data for Non-Newtonian Solutions and Slurries in Pipes*. "International Journal of Multiphase Flow", s.d., vol. 5, pág. 553–561.
- [67] QUINTELA, A. C. – *Hidráulica*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1981.

- [68] RADIN, I.; ZAKIN, J. L.; PATTERSON, G. K. – *Drag Reduction in Solid–Fluid Systems*. "Journal of the American Institution of Chemical Engineers", Mar. 1975, vol. 21 (2), pág. 358–371.
- [69] RICKERT, D.A.; HUNTER, J.V. – *General Nature of Soluble and Particulate Organics in Sewage and Secondary Effluent*. "Water Research", 1971, vol. 5, pág. 421–436.
- [70] RICKERT, D.A.; HUNTER, J.V. – *Rapid Fractionation and Materials Balance of Solids Fraction in Wastewater and Wastewater Effluent*. "Journal WPCF", 1967, vol. 39, pág. 1475–1486.
- [71] RUTGERS, R. – *Relative Viscosity of Suspensions of Rigid Spheres in Newtonian Liquids*. "Rheologica Acta", 1962, vol. 2, pág. 202–210.
- [72] RYAN, N.W.; JOHNSON, M.M. – *Transition from Laminar to Turbulent Flow in Pipes*. "AICh.E. Journal", 1959, vol. 5, pág. 433–435
- [73] SCHLICHTING, H. – *Boundary Layer Theory*. 7th Edition, New York: Mc Graw–Hill, 1979.
- [74] SCHOWALTER, W. R. – *Mechanics of Non–Newtonian Fluids*. Londres: Pergamon Press, 1978.
- [75] SKELLAND, A. H. P. – *Non–Newtonian Flow and Heat Transfer*. E.U.A.: John Wiley & Sons, Inc., 1967.
- [76] SHAW, R. – *The Influence of Hole Dimensions on Static Pressure Measurements*. "Journal of Fluid Mechanics", 1960, vol. 7, pág. 550–569.
- [77] SOLOUKHIN, R.I.; CURTIS, C.W.; EMRICH, R.J. – *Measurements of Pressure*. "Methods of Experimental Physics", part 5, vol.18 B, Academic Press: New York, 1981.
- [78] SHOOK, C.A. – *"Hydrotransport 12 – Slurry Handling and Pipeline Transport"*. bH¹ Group: Publication 6, 1993.
- [79] STREETER, V.L.; WYLIE, E.B. – *Fluid Mechanics*. 7th Edition, New York: Mc Graw–Hill, 1979.
- [80] THOMAS, D.G. – *Transport Characteristics of Suspensions VIII – A Note on the Viscosity of Newtonian Suspensions of Uniforme Spherical Particles*. "J. Colloid Sci.", 1965, vol. 20, pág. 267–277.
- [81] THOMAS, D.G. – *Transport Characteristics of Suspensions: Part IV. Friction Loss of Concentrated–Flocculated Suspensions in Turbulent Flow*. "AICh.E. Journal", 1962, vol. 8, nº 2, pág. 266–271.

- [82] TROPEA, C. – *Measuring Techniques in Experimental Fluid Mechanics*. Lectures 1–14, LSTM–Erlangen, 1985.
- [83] TROKOLANSKI, A.T. – *Theorie et Pratique des Mesures Hydrauliques*. Paris: Dunod.
- [84] WALTERS, K. – *Rheometry*. London: Chapman and Hall Ltd, 1975.
- [85] WALTERS, K. – *Rheometry: Industrial Applications*. E.U.A.: Research Studies Press, 1980.
- [86] WPCF TECHNICAL PRACTICE COMMITTEE CONTROL GROUP – *Manuals of Practice for Water Pollution Control*, 1987.
- [87] W. WESLEY ECKENFELDER, Jr. – *Industrial Water Pollution Control*. 2^a Ed, New York: McGraw–Hill Book Co., 1989.
- [88] WHITE, F.M. – *Fluid Mechanics*. Second Edition, New York: Mc Graw–Hill, 1986.
- [89] WHITE, F.M. – *Viscous Fluid Flow*. New York: Mc Graw–Hill, 1974.
- [90] YANG, T.M.T., KRIEGER, I.M. – *Comparison of Methods for Calculating Shear Rates in Coaxial Viscometers*. "J. Rheology", 1978, vol. 22, pág. 413.

ÍNDICE

	pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTUDOS ANTECEDENTES	6
3. ORIGEM, TRATAMENTO E DESTINO FINAL DAS LAMAS	13
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS SÓLIDOS EXISTENTES NAS ÁGUAS RESIDUAIS	13
3.1.1. Características Físicas	13
3.1.1.1. Concentração	13
3.1.1.2. Densidade	15
3.1.1.3. Granulometria	15
3.1.2. Características Químicas	17
3.1.2.1. Sólidos Orgânicos	17
3.1.2.2. Sólidos Inorgânicos	18
3.1.3. Características Biológicas	19
3.2. COMPOSIÇÃO DAS ÁGUAS RESIDUAIS	21
3.3. TRATAMENTO DAS ÁGUAS RESIDUAIS	22
3.3.1. Decantação de Partículas Sólidas	25
3.3.1.1. Sedimentação Discreta	25
3.3.1.2. Sedimentação Floculenta	27
3.3.1.3. Sedimentação Forçada	28
3.3.1.4. Sedimentação por Compressão	29
3.3.2. Oxidação Biológica da Matéria Orgânica	30
3.3.3. Produção de Lamas numa Estação de Tratamento	35
3.3.3.1. Sedimentadores Primários	35
3.3.3.2. Sedimentadores Secundários	35
3.3.3.3. Volume de Lamas Produzidas	36
3.4. TRATAMENTO DAS LAMAS	37
3.4.1. Espessamento	39
3.4.2. Estabilização	41
3.4.2.1. Digestão Anaeróbia	41
3.4.3. Condicionamento Químico	48
3.4.4. Desidratação	49
3.5. DESTINO FINAL DAS LAMAS	50

4. REOLOGIA DAS LAMAS	55
4.1. INTRODUÇÃO	55
4.2. CLASSIFICAÇÃO REOLÓGICA DOS FLUIDOS	58
4.2.1. Fluidos Newtonianos	58
4.2.2. Fluidos não-Newtonianos	59
4.2.2.1. Fluidos Não-Newtonianos com Características Reológicas Independentes do Tempo	59
4.2.2.1.1. Fluidos com Tensão de Cedência	60
4.2.2.1.2. Fluidos sem Tensão de Cedência	63
4.2.2.2. Fluidos Não-Newtonianos com Características Reológicas Dependentes do Tempo	65
4.2.2.3. Fluidos Viscoelásticos	67
4.3. REOLOGIA DAS SUSPENSÕES	69
4.3.1. Suspensões de Partículas Sólidas Esféricas, Monodimensionais e Electricamente Neutras em Líquidos Newtonianos	72
4.3.2. Suspensões de Sólidos de Qualquer Natureza em Líquidos Newtonianos	75
4.4. DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS DOS FLUIDOS	78
4.4.1. Tubo Viscométrico ou Reómetro de Extrusão	80
4.4.2. Cilindro Concêntrico	82
4.4.3. Cilindro Concêntrico em Meio Infinito	85
4.4.4. Cone e Prato	85
4.4.5. Detecção de Comportamentos Reológicos Dependentes do Tempo	87
4.4.6. Medição da Tensão de Cedência	87
4.4.6.1. Métodos Indirectos	88
4.4.6.2. Métodos Directos	88
4.4.6.2.1. Teste da Tensão Residual	88
4.4.6.2.2. " <i>Creep Test</i> "	89
4.4.6.2.3. Teste da Tensão de Ruptura	90
4.4.6.2.4. " <i>Vane Test</i> "	91
4.4.6.2.5. " <i>Cone Penetration Test</i> " CPT	92
4.5. DESLIZAMENTO JUNTO ÀS FRONTEIRAS SÓLIDAS DO ESCOAMENTO	93

5. ESCOAMENTO DAS LAMAS	97
5.1. EQUAÇÕES GERAIS APLICÁVEIS AOS ESCOAMENTOS SOB PRESSÃO	97
5.1.1. Equação de Continuidade	97
5.1.2. Teorema de Bernoulli	99
5.1.3. Equações de Equilíbrio Dinâmico	102
5.2. ESCOAMENTOS LAMINARES	104
5.2.1. Lei do Movimento	105
5.2.1.1. Fluidos sem Tensão de Cedência	106
5.2.1.2. Fluidos Plásticos de Bingham	107
5.2.1.3. Fluidos de Herschell-Bulkley	108
5.2.2. Fórmulas de Resistência	109
5.2.2.1. Fluidos sem Tensão de Cedência	110
5.2.2.2. Fluidos Plásticos de Bingham	112
5.2.2.3. Fluidos de Herschell-Bulkley	113
5.2.2.4. Método Generalizado de Metzner e Reed	114
5.2.3. Perfil de Velocidades	116
5.2.3.1. Fluidos sem Tensão de Cedência	116
5.2.3.2. Fluidos Plásticos de Bingham	118
5.2.3.3. Fluidos de Herschell-Bulkley	120
5.3. TRANSIÇÃO DOS ESCOAMENTOS LAMINARES PARA OS TURBULENTOS	120
5.4. ESCOAMENTOS TURBULENTOS	124
5.4.1. Regime Turbulento Liso	126
5.4.1.1. Lei do Movimento	126
5.4.1.2. Fórmulas de Resistência	129
5.4.1.2.1. Fluidos sem Tensão de Cedência	129
5.4.1.2.2. Fluidos Plásticos de Bingham	134
5.4.1.2.3. Fluidos de Herschell-Bulkley	136
5.4.1.3. Perfil de Velocidades	137
5.4.1.3.1. Teoria de Prandtl	137
5.4.1.3.2. Teoria de Clapp	139
5.4.2. Regime Turbulento Rugoso	141
5.4.2.1. Fórmulas de Resistência	141
5.4.2.2. Perfil de Velocidades	142
5.4.3. Regime de Transição Liso-Rugoso	144
5.5. ESTABELECIMENTO DO ESCOAMENTO	145
5.6. REDUÇÃO DO ARRASTO	148

6. ESTUDOS EXPERIMENTAIS	151
6.1. REACTOR BIOLÓGICO ANAERÓBIO	152
6.1.1. Sistema de Agitação das Lamas	155
6.1.2. Sistema de Aquecimento das Lamas	156
6.2. ACOMPANHAMENTO E CONTROLO DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA	158
6.2.1. Medição do Biogás	158
6.2.2. Medição dos Sólidos Totais e Voláteis	160
6.2.3. Medição e Controlo do pH	161
6.3. CIRCUITO FECHADO DESTINADO AOS ESTUDOS HIDRODINÂMICOS	162
6.3.1. Grupo Electro-Bomba	162
6.3.2. Zona de Experiências	165
6.3.3. Tomadas de Pressão	167
6.3.4. Sistema de Purga do Biogás e Limpeza das Tubagens de Ligação entre as Tomadas de Pressão e o Transdutor Diferencial de Pressão	171
6.4. SISTEMA DE MEDIÇÃO, AQUISIÇÃO E AFERIÇÃO DOS DADOS	175
6.4.1. Medidores de Pressão	176
6.4.2. Medidor de Caudal	178
6.4.3. Sistema de Aquisição de Dados	181
6.4.4. Medidores de Sinal Eléctrico	183
6.5. CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO	183
6.5.1. Transdutor Diferencial de Pressão	183
6.5.2. Medidor Electromagnético de Caudal	186
6.6. ENSAIOS REOLÓGICOS	187
6.6.1. Unidade Electrónica	189
6.6.2. Unidade Universal de Medida	190
6.6.3. Geometrias Utilizadas	191
6.6.4. Unidade de Aquisição, Tratamento e Registo de Dados	194
6.6.5. Unidade para Controlo da Temperatura	194
6.7. ENSAIOS GRANULOMÉTRICOS	195
6.7.1. Unidade de Medição	196
6.7.2. Unidade de Preparação de Amostras, PS 14 B	198
6.7.3. Sistema de Aquisição, Tratamento e Registo de Dados	198

	pág.
7. ANÁLISE DOS RESULTADOS	199
7.1. ESTUDOS PRELIMINARES COM ÁGUA	199
7.1.1. Análise dos Resultados Obtidos	201
7.2. EXPERIÊNCIAS COM LAMAS Digeridas	203
7.2.1. Primeira Série de Experiências com Lamas Digeridas	204
7.2.1.1. Análise dos Resultados Obtidos	206
7.2.2. Segunda Série de Experiências com Lamas Digeridas	210
7.2.2.1. Análise dos Resultados Obtidos	214
7.3. EXPERIÊNCIAS COM LAMAS EM DIGESTÃO ANAERÓBIA	220
7.3.1. Primeira Série de Experiências com Lamas em Digestão Anaeróbia	220
7.3.1.1. Análise dos Resultados Obtidos	230
7.3.2. Segunda Série de Experiências com Lamas em Digestão Anaeróbia	238
7.3.2.1. Análise dos Resultados Obtidos	247
7.4. COMENTÁRIOS FINAIS E COMPARAÇÃO COM OS ESTUDOS ANTECEDENTES	253
8. CONCLUSÕES	257

ÍNDICE DE FIGURAS

pág.

CAPÍTULO 2 – ESTUDOS ANTECEDENTES

- figura 1* – Intervalos de confiança (90%) para o comportamento reológico de uma lama digerida com uma concentração em sólidos de 8% (*adaptado de Brown et al [12]*). 9
- figura 2* – Tensão de cedência das lamas produzidas nas ETAR's (*adaptado de Mulbarger et al [55]*). 10
- figura 3* – Coeficiente de rigidez das lamas produzidas nas ETAR's (*adaptado de Mulbarger et al [55]*). 10

CAPÍTULO 3 – ORIGEM TRATAMENTO E DESTINO FINAL DAS LAMAS

- figura 4* – Caracterização granulométrica das partículas sólidas presentes numa água residual (*adaptado de Levine et al [46]*). 17
- figura 5* – Estrutura celular típica das bactérias (*adaptado de Metcalf & Eddy [51]*). 20
- figura 6* – Fluxograma típico das diversas etapas de tratamento de águas residuais existentes numa ETAR convencional por lamas activadas. 23
- figura 7* – Esquema típico de um processo de sedimentação forçada. 29
- figura 8* – Assimilação biológica do substrato existente num meio líquido por parte dos microrganismos. 31
- figura 9* – Evolução das colónias de bactérias e rotíferos durante o processo de oxidação biológica da matéria orgânica (*adaptado de Metcalf & Eddy [51]*). 32
- figura 10* – Funcionamento típico de um sistema de tratamento por lamas activadas. 33
- figura 11* – Relação entre a carga mássica e as características de sedimentabilidade das lamas no processo de tratamento por lamas activadas. 34
- figura 12* – Fluxograma de um processo típico de tratamento de lamas. 39

<i>figura 13</i> –	Diagrama sequencial do processo de digestão anaeróbia de lamas (<i>adaptado de WPCF [86]</i>).	42
<i>figura 14</i> –	Representação esquemática de um digestor anaeróbio não aquecido.	44
<i>figura 15</i> –	Fluxograma de um processo de digestão anaeróbia aquecida.	46
<i>figura 16</i> –	Esquema típico de um sistema de condicionamento químico de lamas (<i>adaptado de Degremont [19]</i>).	59
 CAPÍTULO 4 – REOLOGIA DAS LAMAS		
<i>figura 17</i> –	Diagrama representativo do comportamento mecânico de um corpo sólido.	56
<i>figura 18</i> –	Escoamento de um fluido Newtoniano, em regime laminar, entre dois elementos de superfície planos e paralelos (<i>adaptado de Novais-Barbosa [60]</i>).	58
<i>figura 19</i> –	Diagramas reológicos típicos dos fluidos com características reológicas independentes do tempo.	60
<i>figura 20</i> –	Diagramas reológicos típicos dos fluidos não-Newtonianos com características reológicas dependentes do tempo.	66
<i>figura 21</i> –	Interpretação gráfica dos modelos mecânicos de <i>Maxwell</i> e de <i>Voigt</i> .	68
<i>figura 22</i> –	Representação esquemática dos escoamentos pseudo-homogêneos e heterogêneos.	70
<i>figura 23</i> –	Relação entre a viscosidade relativa e a fracção sólida em suspensões de partículas esféricas, monodimensionais e electricamente neutras (<i>adaptado de Krieger [41]</i>).	74
<i>figura 24</i> –	Influência da existência de partículas sólidas com duas dimensões diferentes na viscosidade da suspensão (<i>adaptado de Barnes et al [6]</i>).	76
<i>figura 25</i> –	Caracterizaçãodo comportamento reológico das suspensões em função do tipo de interacções existente entre as partículas sólidas.	78

	pág.
<i>figura 26</i> – Geometrias normalmente utilizadas nos ensaios reológicos (<i>adaptado de Brown et al [12]</i>).	79
<i>figura 27</i> – Representação esquemática do "Balanced beam tube viscometer" (<i>adaptado de Brown et al [12]</i>).	81
<i>figura 28</i> – Cilindros concêntricos.	83
<i>figura 29</i> – Cone e prato.	86
<i>figura 30</i> – Diagramas típicos resultantes da realização de um "creep test" (<i>adaptado de Nguyen et al [58]</i>).	90
<i>figura 31</i> – Diagrama típico da realização de um teste da tensão de rotura (<i>adaptado de Nguyen et al [58]</i>).	90
<i>figura 32</i> – Representação esquemática do dispositivo utilizado no "vane test".	91
<i>figura 33</i> – Representação esquemática do "cone penetration test" (<i>adaptado de Boger [10]</i>).	92
<i>figura 34</i> – Verificação de ocorrência de deslizamento num tubo viscométrico (<i>adaptado de Brown et al [12]</i>).	94
<i>figura 35</i> – Influência da ocorrência de deslizamento na definição do comportamento reológico dos fluidos (<i>adaptado de Barnes [5]</i>).	95

CAPÍTULO 5 – ESCOAMENTO DAS LAMAS

<i>figura 36</i> – Volume elementar localizado no interior de um domínio fluido (<i>adaptado de Novais-Barbosa [60]</i>).	97
<i>figura 37</i> – Aplicação da equação de continuidade ao escoamento sob pressão numa conduta.	98
<i>figura 38</i> – Interpretação gráfica da expressão global do Teorema de Bernoulli aplicada ao escoamento de um fluido numa conduta sob pressão.	101

	pág.
<i>figura 39</i> – Forças actuantes sobre o volume de fluido existente entre duas secções perpendiculares ao escoamento.	102
<i>figura 40</i> – Sistema de eixos coordenados considerados no estudo de escoamentos laminares.	105
<i>figura 41</i> – Coeficiente de perda de carga para escoamentos laminares de fluidos plásticos de <i>Bingham</i> .	113
<i>figura 42</i> – Perfil de velocidades em fluidos cujo comportamento reológico é do tipo lei de potência (<i>adaptado de Govier et al [29]</i>).	118
<i>figura 43</i> – Perfil de velocidades em fluidos cujo comportamento reológico é do tipo plástico de <i>Bingham</i> (<i>adaptado de Govier et al [29]</i>).	119
<i>figura 44</i> – Números de <i>Reynolds</i> de <i>Bingham</i> críticos em função do número de <i>Hedstrom</i> .	122
<i>figura 45</i> – Sistema de eixos coordenados considerado no estudo de escoamentos turbulentos.	126
<i>figura 46</i> – Ábaco de <i>Dodge e Metzner</i> para determinação do coeficiente de perda de carga em escoamentos turbulentos lisos de fluidos sem tensão de cedência.	132
<i>figura 47</i> – Ábaco para determinação do coeficiente de atrito de <i>Fanning</i> em fluidos plásticos de <i>Bingham</i> .	136
<i>figura 48</i> – Perfil de velocidades em regime turbulento liso.	140
<i>figura 49</i> – Ábaco para determinação da constante de proporcionalidade, K_λ , entre as perdas de carga em regime turbulentos não lisos e lisos.	145
<i>figura 50</i> – Estabelecimento do escoamento (<i>adaptado de Novais-Barbosa [60]</i>).	146
<i>figura 51</i> – Diagrama de <i>Collins-Schowater</i> para determinação do coeficiente de estabelecimento no escoamento laminar de fluidos sem tensão de cedência.	146

<i>figura 52</i> – Diagrama de <i>Michiyoshi–Mizuno–Hoshiai</i> para determinação do coeficiente de estabelecimento no escoamento laminar de fluidos plásticos de <i>Bingham</i> .	147
<i>figura 53</i> – Previsão dos vários tipos possíveis de redução do arrasto em função do tipo de sólidos presente no fluido (<i>adaptado de Radin et al [68]</i>).	149
 CAPÍTULO 6 – ESTUDOS EXPERIMENTAIS	
<i>figura 54</i> – Representação esquemática da instalação experimental.	153
<i>figura 55</i> – Reactor biológico anaeróbio de lamas.	154
<i>figura 56</i> – Agitador de mistura lenta das lamas e dispositivo anti-fugas de biogás.	156
<i>figura 57</i> – Dispositivo utilizado para aquecimento das lamas no digestor.	157
<i>figura 58</i> – Esquema utilizado para aquecimento e controlo do aquecimento das lamas.	158
<i>figura 59</i> – Instalação de recolha e medição do biogás produzido no reactor.	159
<i>figura 60</i> – Curva de calibração do medidor volumétrico de biogás.	159
<i>figura 61</i> – Esquema e dimensões do circuito hidráulico fechado onde se realizaram os estudos hidrodinâmicos.	163
<i>figura 62</i> – Princípio de operação de uma "mohno"-bomba.	164
<i>figura 63</i> – "Mohno"-bomba utilizada.	165
<i>figura 64</i> – Zona de teste da instalação onde se realizaram os ensaios hidrodinâmicos.	166
<i>figura 65</i> – Estrutura de suporte para as condutas.	167
<i>figura 66</i> – Configuração e relação aconselhada de dimensões numa tomada de pressão (<i>adaptado de Tropea [82]</i>).	169

	pág.
<i>figura 67</i> – Configuração das tomadas de pressão utilizadas.	170
<i>figura 68</i> – Sistema projectado para permitir a purga e limpeza da tubagem de ligação entre as tomadas de pressão e o transdutor diferencial de pressão.	172
<i>figura 69</i> – Equipamento utilizado para a medição da pressão diferencial.	174
<i>figura 70</i> – Transdutor de pressão diferencial utilizado.	176
<i>figura 71</i> – Caracterização da unidade sensora.	177
<i>figura 72</i> – Esquema de funcionamento do transmissor de pressão diferencial <i>Rosemount 3051CD</i> .	178
<i>figura 73</i> – Medidor electromagnético de caudal utilizado.	179
<i>figura 74</i> – Princípio de funcionamento do medidor electromagnético de caudal.	180
<i>figura 75</i> – Gama de erro do medidor de caudal <i>Magflo da Danfoss</i> .	181
<i>figura 76</i> – Unidade de aquisição de dados <i>GPIS</i> .	181
<i>figura 77</i> – Dispositivo utilizado para calibração do transdutor diferencial de pressão.	184
<i>figura 78</i> – Esquema global do dispositivo de calibração das células de pressão.	185
<i>figura 79</i> – Calibração estática do transdutor diferencial de pressão.	186
<i>figura 80</i> – Calibração do medidor de caudal.	187
<i>figura 81</i> – Instalação destinada à realização de ensaios reológicos.	188
<i>figura 82</i> – Esquema de funcionamento do equipamento destinado à realização dos ensaios reológicos.	189
<i>figura 83</i> – Cilindros concêntricos, modelo MS-Z1 DIN.	191
<i>figura 84</i> – Cilindros concêntricos, modelo MS-Z2 DIN.	193

<i>figura 85</i> –	Configuração óptica do processo de medição utilizado nos ensaios granulométricos.	195
<i>figura 86</i> –	Equipamento de realização dos ensaios granulométricos.	197

CAPÍTULO 7 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

<i>figura 87</i> –	Resultados obtidos nos estudos preliminares com água num sistema de eixos adimensional.	202
<i>figura 88</i> –	Aplicação da equação reológica mais provável aos resultados obtidos na 1ª experiência realizada na 1ª série de experiências com lamas digeridas.	208
<i>figura 89</i> –	Aplicação da equação reológica mais provável aos resultados obtidos na 2ª experiência realizada na 1ª série de experiências com lamas digeridas.	208
<i>figura 90</i> –	Aplicação da equação reológica mais provável aos resultados obtidos na 3ª experiência realizada na 1ª série de experiências com lamas digeridas.	208
<i>figura 91</i> –	Aplicação da equação reológica mais provável aos resultados obtidos na 1ª experiência realizada na 2ª série de experiências com lamas digeridas.	215
<i>figura 92</i> –	Aplicação da equação reológica mais provável aos resultados obtidos na 2ª experiência realizada na 2ª série de experiências com lamas digeridas.	215
<i>figura 93</i> –	Aplicação da equação reológica mais provável aos resultados obtidos na 3ª experiência realizada na 2ª série de experiências com lamas digeridas.	215
<i>figura 94</i> –	Aplicação da equação reológica mais provável aos resultados obtidos na 4ª experiência realizada na 2ª série de experiências com lamas digeridas.	216
<i>figura 95</i> –	Aplicação da equação reológica mais provável aos resultados obtidos na 5ª experiência realizada na 2ª série de experiências com lamas digeridas.	216
<i>figura 96</i> –	Aplicação da equação reológica mais provável aos resultados obtidos na 6ª experiência realizada na 2ª série de experiências com lamas digeridas.	216

<i>figura 97</i> –	Evolução provável da tensão de cedência durante as duas séries de experiências com lamas digeridas.	217
<i>figura 98</i> –	Relação entre os coeficientes de perda de carga das lamas digeridas e de um fluido <i>Newtoniano</i> .	218
<i>figura 99</i> –	Evolução do diâmetro médio das partículas sólidas na 2ª série de experiências com lamas digeridas.	218
<i>figura 100</i> –	Evolução do teor em sólidos totais e voláteis na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	222
<i>figura 101</i> –	Produção acumulada de biogás na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	222
<i>figura 102</i> –	Evolução do diâmetro médio das partículas sólidas na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	230
<i>figura 103</i> –	Evolução da tensão de cedência, na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	231
<i>figura 104</i> –	Evolução do coeficiente de consistência, na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	232
<i>figura 105</i> –	Evolução do índice de potência, na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	232
<i>figura 106</i> –	Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 1ª experiência da 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	234
<i>figura 107</i> –	Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 2ª experiência da 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	234
<i>figura 108</i> –	Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 3ª experiência da 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	234
<i>figura 109</i> –	Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 4ª experiência da 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	235

<i>figura 110</i> – Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 5ª experiência da 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	235
<i>figura 111</i> – Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 6ª experiência da 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	235
<i>figura 112</i> – Limites para a relação entre os coeficientes de perda de carga das lamas e de um fluido Newtoniano com base nos resultados obtidos na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	236
<i>figura 113</i> – Evolução do teor em sólidos totais e voláteis na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	239
<i>figura 114</i> – Produção acumulada de biogás durante a 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	240
<i>figura 115</i> – Evolução do diâmetro médio das partículas sólidas na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	247
<i>figura 116</i> – Evolução da tensão de cedência, na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	248
<i>figura 117</i> – Evolução do coeficiente de consistência, na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	248
<i>figura 118</i> – Evolução do índice de potência, na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	249
<i>figura 119</i> – Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 1ª experiência da 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	250
<i>figura 120</i> – Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 2ª experiência da 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	251
<i>figura 121</i> – Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 3ª experiência da 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	251

<i>figura 122</i> – Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 4ª experiência da 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	251
<i>figura 123</i> – Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 5ª experiência da 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	252
<i>figura 124</i> – Aplicação da equação reológica aos resultados obtidos na 6ª experiência da 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	252
<i>figura 125</i> – Limites para a relação entre os coeficientes de perda de carga das lamas e de um fluido Newtoniano com base nos resultados obtidos na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	253

ÍNDICE DE QUADROS

pág.

CAPÍTULO 2 – ESTUDOS ANTECEDENTES

<i>quadro 1</i> –	Resumo das características preconizadas pelo <i>Water Research Centre</i> para determinação dos parâmetros reológicos das lamas (<i>adaptado de Frost [27]</i>).	8
-------------------	--	---

CAPÍTULO 3 – ORIGEM TRATAMENTO E DESTINO FINAL DAS LAMAS

<i>quadro 2</i> –	Composição típica de uma água residual afluenta a uma ETAR.	22
<i>quadro 3</i> –	Estimativa da remoção de CBO ₅ e da produção de lamas em ETAR's com tratamento biológico por lamas activadas.	37
<i>quadro 4</i> –	Características das lamas nos órgãos destinados ao seu tratamento.	47

CAPÍTULO 6 – ESTUDOS EXPERIMENTAIS

<i>quadro 5</i> –	Especificações técnicas da unidade electrónica Rheolab MC 100.	189
<i>quadro 6</i> –	Especificações técnicas do modelo MS-Z1 DIN.	192
<i>quadro 7</i> –	Especificações técnicas do modelo MS-Z2 DIN.	193

CAPÍTULO 7 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

<i>quadro 8</i> –	Elementos sobre os estudos hidrodinâmicos com água.	220
<i>quadro 9</i> –	Elementos estatísticos referentes aos ensaios hidrodinâmicos realizados com água.	201
<i>quadro 10</i> –	Resultados obtidos nas análises efectuadas para determinação da concentração em sólidos na 1ª série de experiências com lamas digeridas.	204

quadro 11 – Elementos sobre os estudos hidrodinâmicos realizados na 1ª série de experiências com lamas digeridas.	205
quadro 12 – Elementos estatísticos referentes aos estudos hidrodinâmicos realizados na 1ª série de experiências com lamas digeridas.	206
quadro 13 – Resultados obtidos nas análises efectuadas para determinação da concentração em sólidos na 2ª série de experiências com lamas digeridas.	210
quadro 14 – Elementos sobre os estudos hidrodinâmicos realizados na 2ª série de experiências com lamas digeridas.	211
quadro 15 – Elementos estatísticos referentes aos estudos hidrodinâmicos realizados na 2ª série de experiências com lamas digeridas.	212
quadro 16 – Resultados obtidos nos estudos granulométricos realizados na 2ª série de experiências com lamas digeridas.	213
quadro 17 – Resultados obtidos nas análises efectuadas para determinação da concentração em sólidos na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	221
quadro 18 – Resultados obtidos nos estudos reológicos realizados na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	224
quadro 19 – Elementos estatísticos relativos aos ajustes dos modelos reológicos aos resultados obtidos na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	225
quadro 20 – Elementos sobre os estudos hidrodinâmicos realizados na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	227
quadro 21 – Elementos estatísticos referentes aos estudos hidrodinâmicos realizados na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	228
quadro 22 – Resultados obtidos nos estudos granulométricos realizados na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	229

quadro 23 –	Variação dos parâmetros reológicos durante o processo de digestão na 1ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	233
quadro 24 –	Resultados obtidos nas análises efectuadas para determinação da concentração em sólidos na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	239
quadro 25 –	Resultados obtidos nos estudos reológicos realizados na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	241
quadro 26 –	Elementos estatísticos relativos aos ajustes dos modelos reológicos aos resultados obtidos na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	242
quadro 27 –	Elementos sobre os estudos hidrodinâmicos realizados na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	244
quadro 28 –	Alguns elementos estatísticos referentes aos estudos hidrodinâmicos realizados na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	245
quadro 29 –	Resultados obtidos nos estudos granulométricos realizados na 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	246
quadro 30 –	Variação dos parâmetros reológicos durante o processo de digestão na 1ª e 2ª série de experiências com lamas em digestão anaeróbia.	249
quadro 31 –	Comparação entre os valores dos parâmetros do modelo reológico de <i>Herschell-Bulkley</i> obtidos nos estudos experimentais e as gamas máxima e mínima propostas por <i>Frost</i> [27].	254
quadro 32 –	Comparação entre os valores dos parâmetros do modelo reológico plástico de <i>Bingham</i> obtidos nos estudos experimentais e os valores máximos e mínimos propostos por <i>Mulbarger et al</i> [55].	254

ANEXO A

**RESULTADOS OBTIDOS
NOS ESTUDOS HIDRODINÂMICOS**

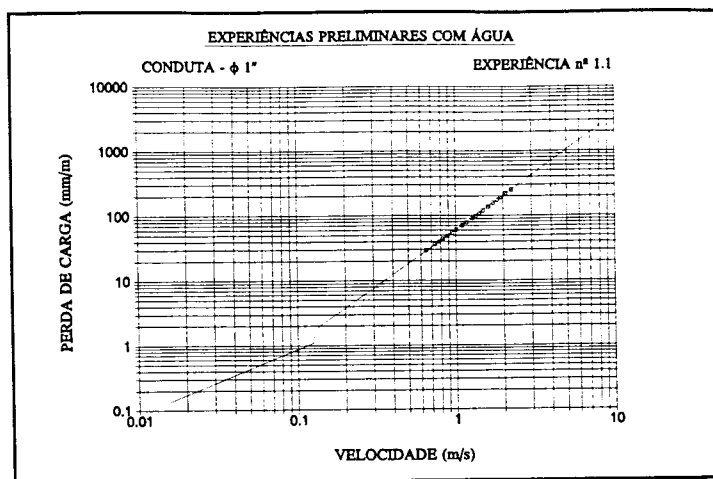


figura A.1

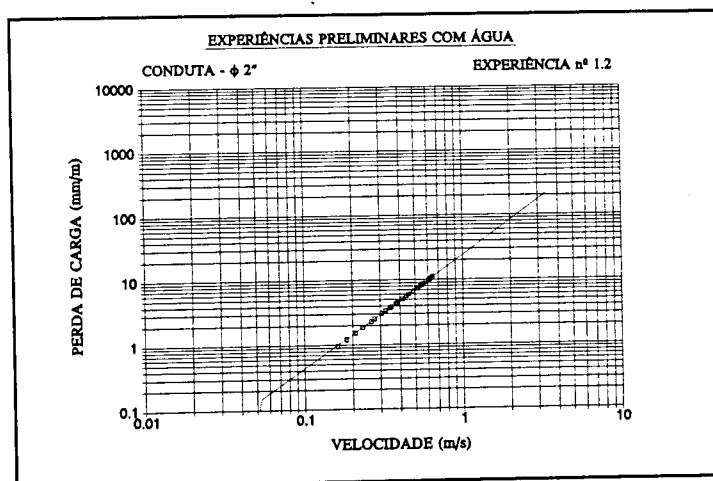


figura A.2

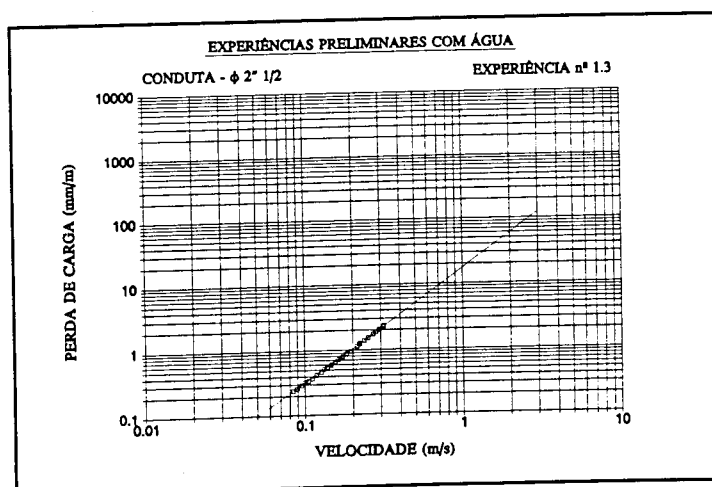


figura A.3

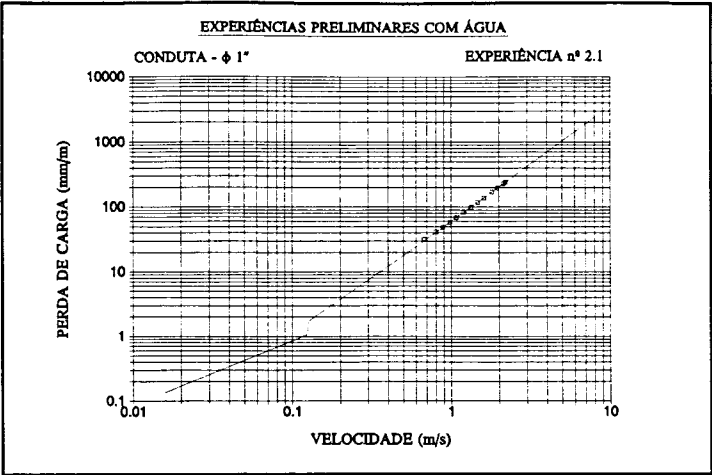


figura A.4

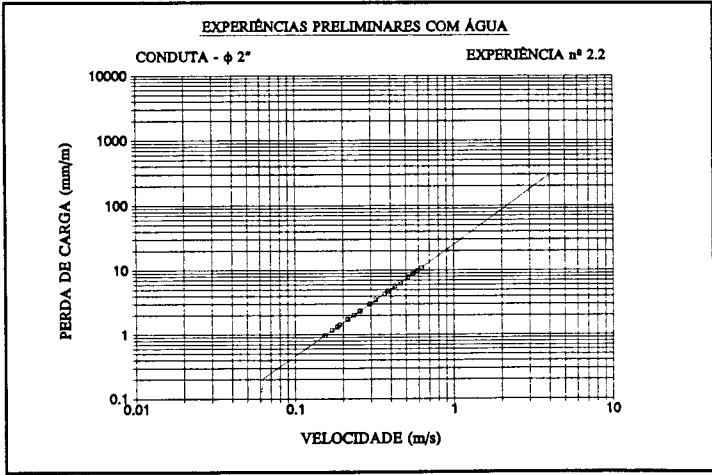


figura A.5

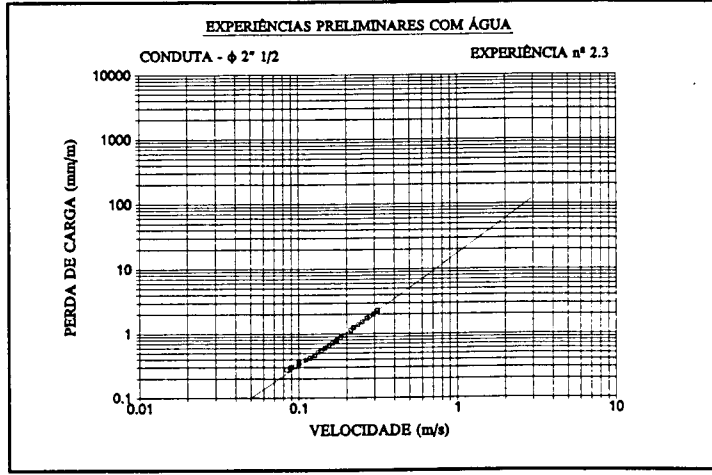


figura A.6

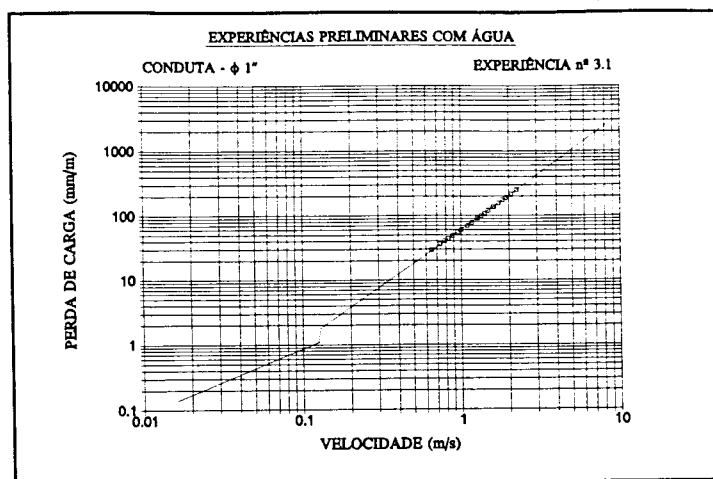


figura A.7

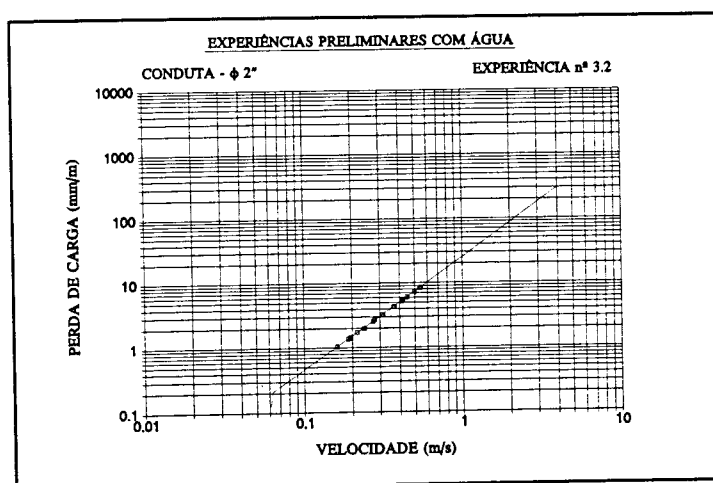


figura A.8

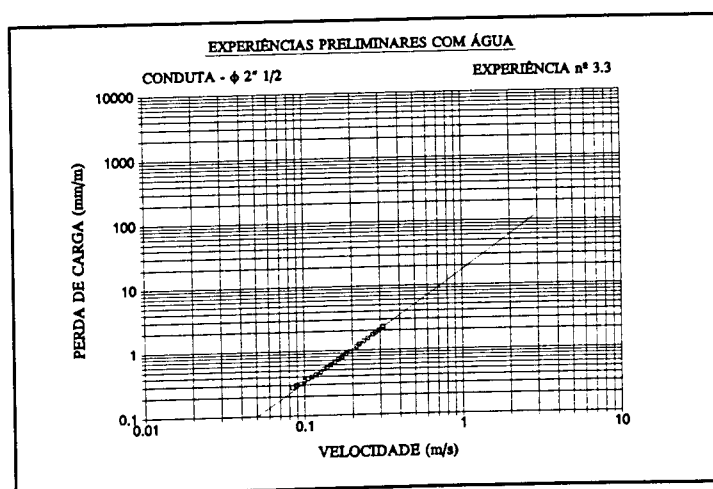


figura A.9

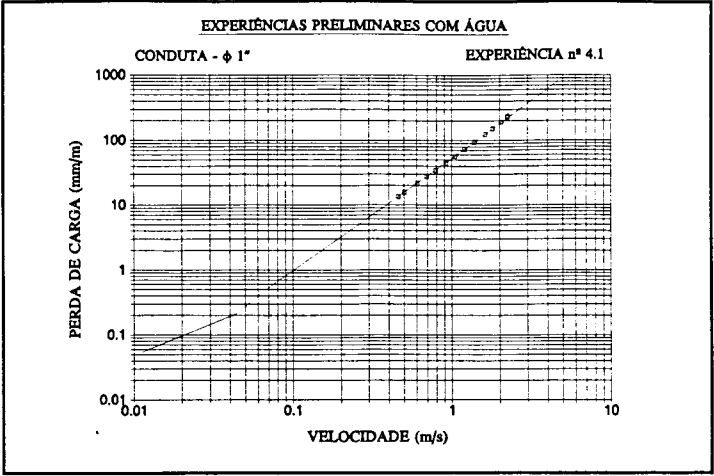


figura A.10

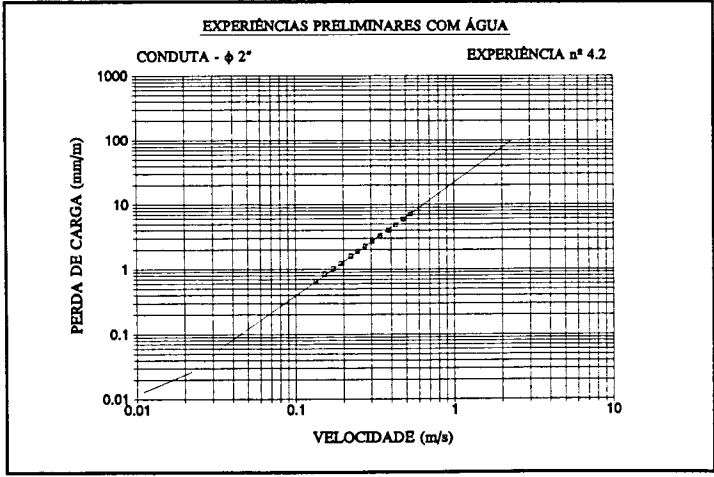


figura A.11

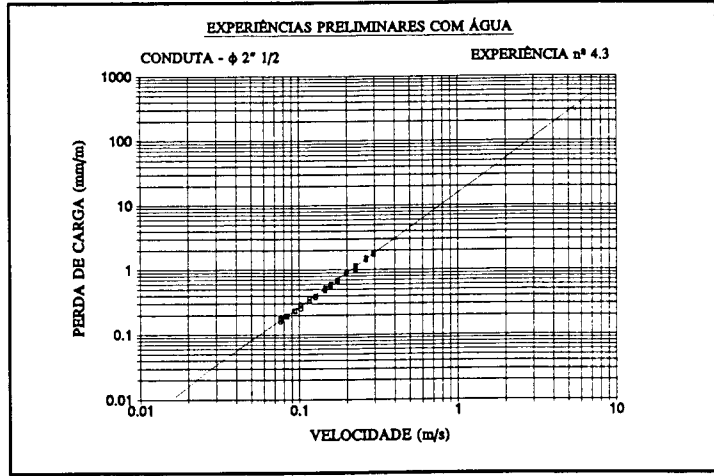


figura A.12

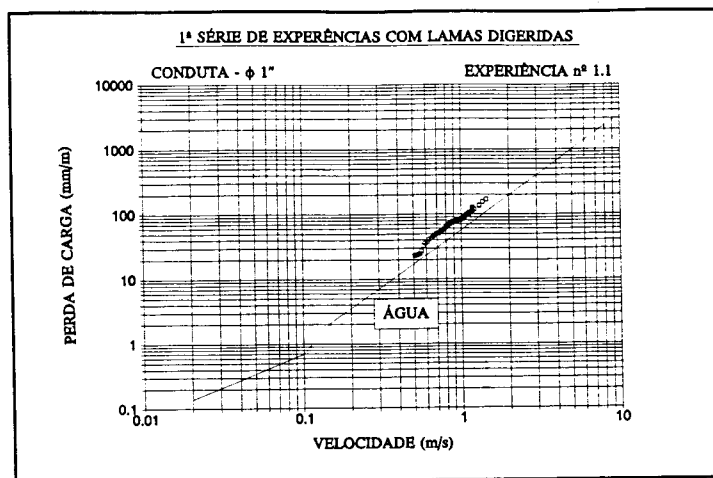


figura A.13

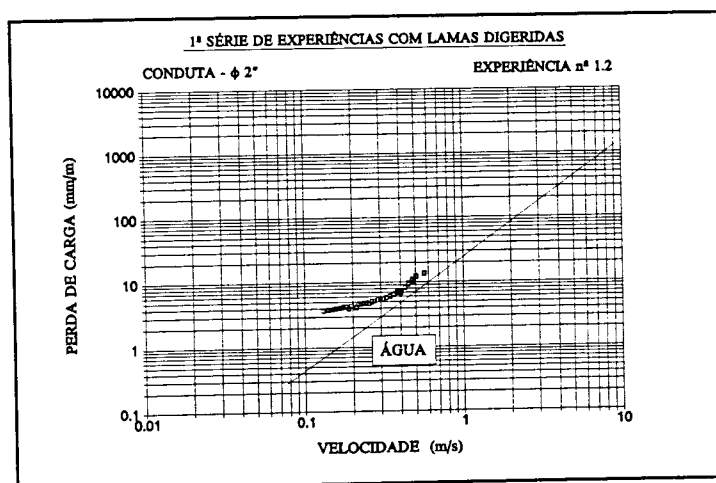


figura A.14

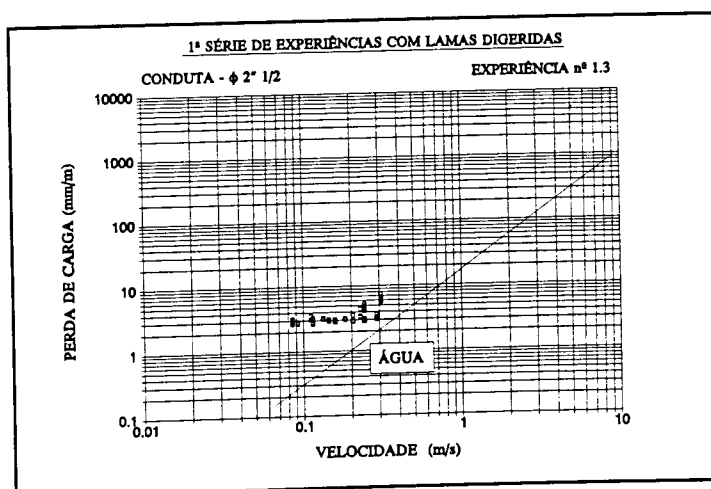


figura A.15

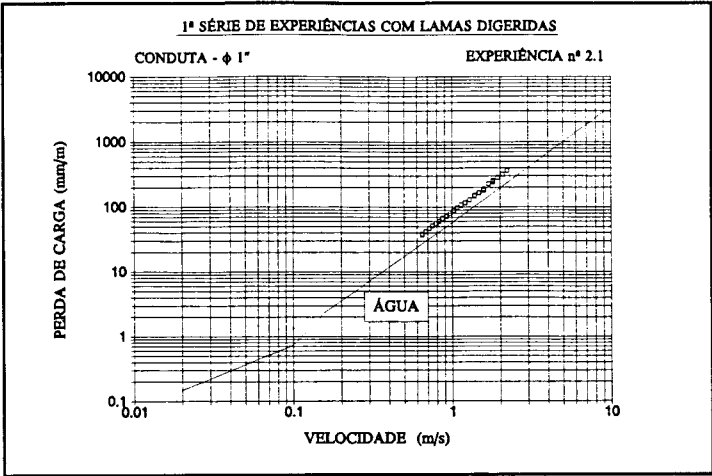


figura A.16

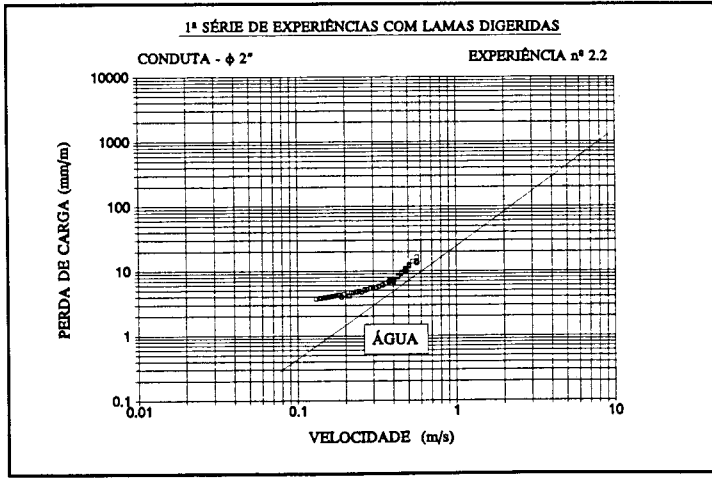


figura A.17

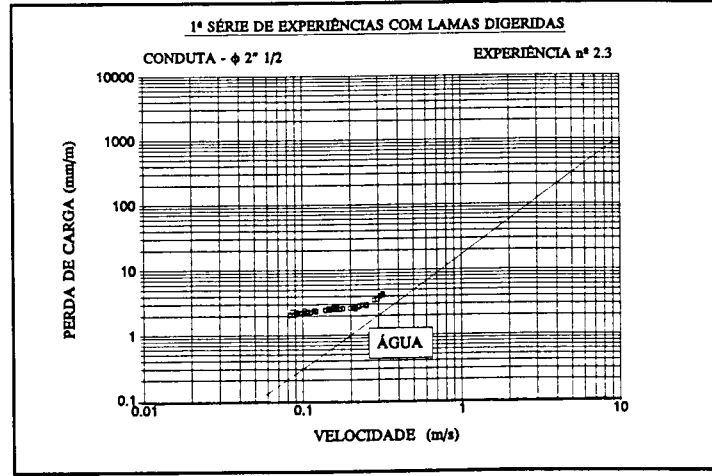


figura A.18

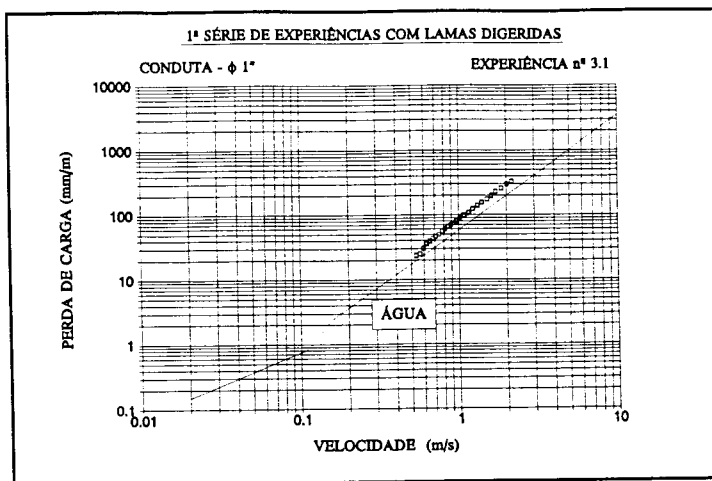


figura A.19

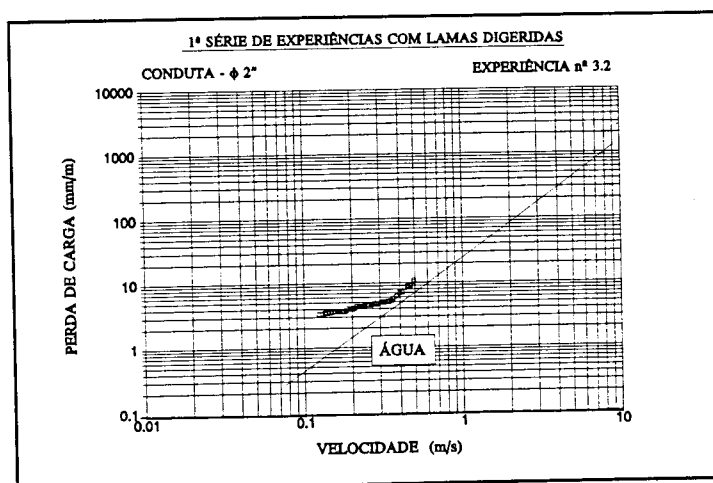


figura A.20

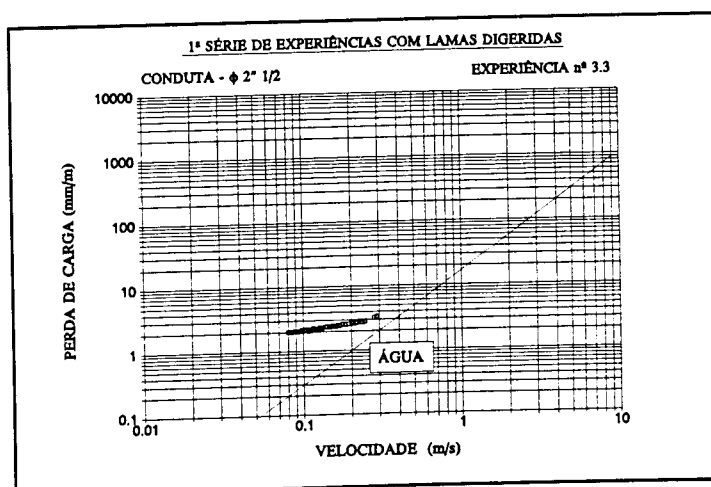


figura A.21

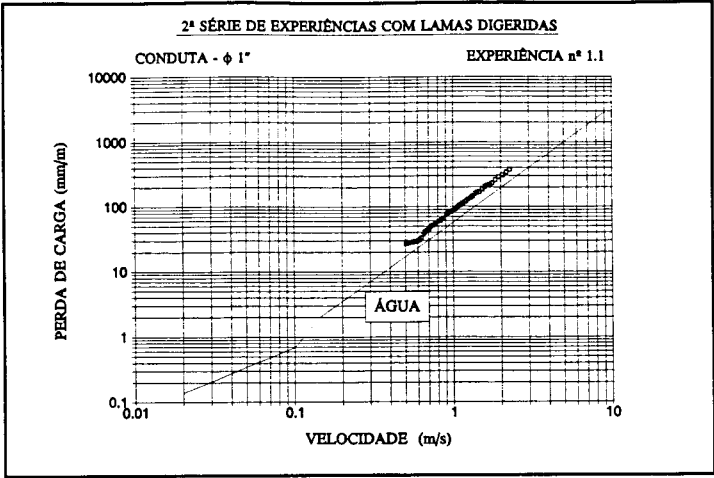


figura A.22

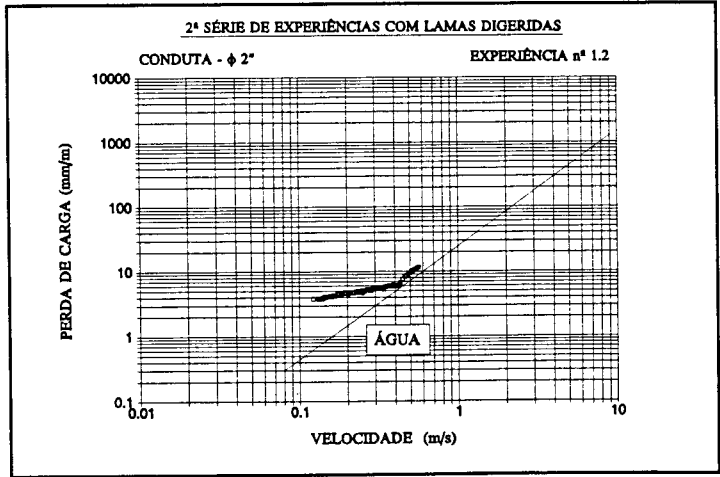


figura A.23

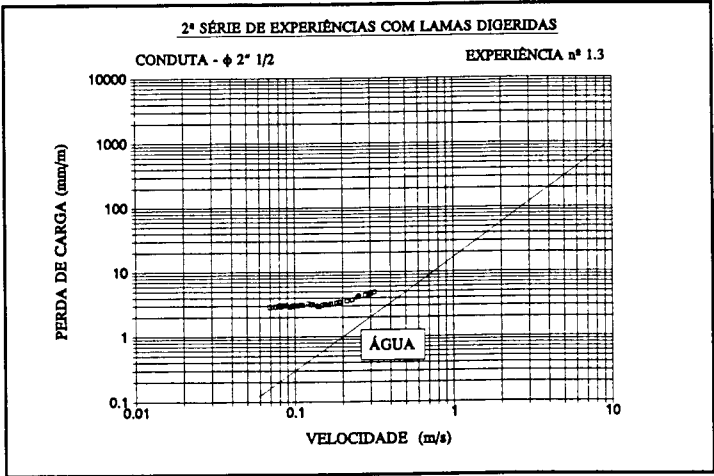


figura A.24

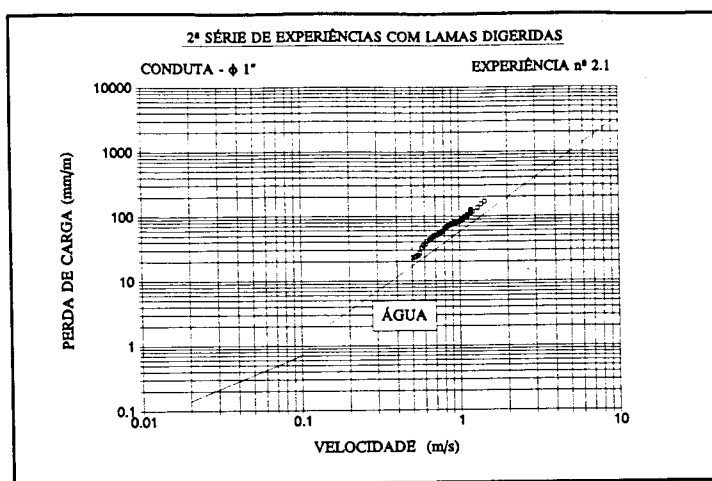


figura A.25

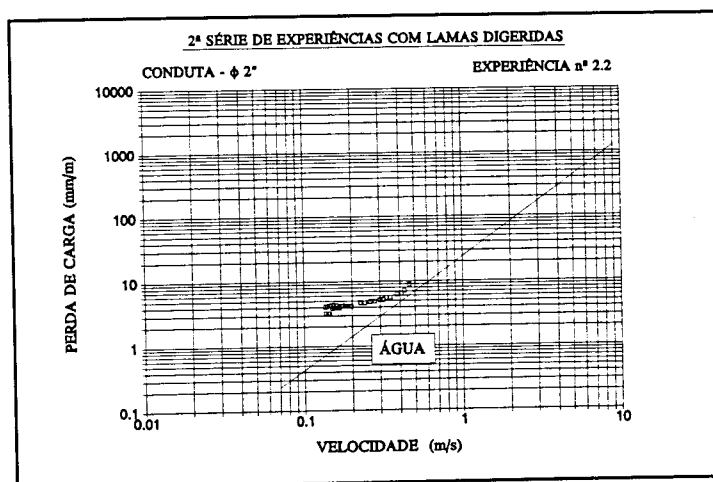


figura A.26

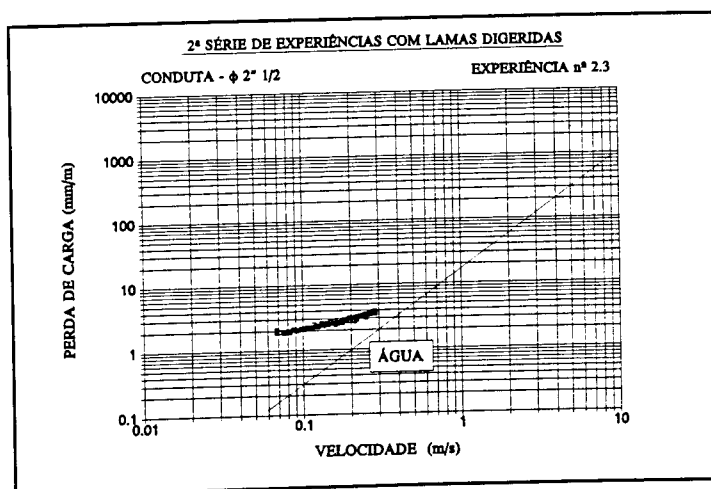


figura A.27

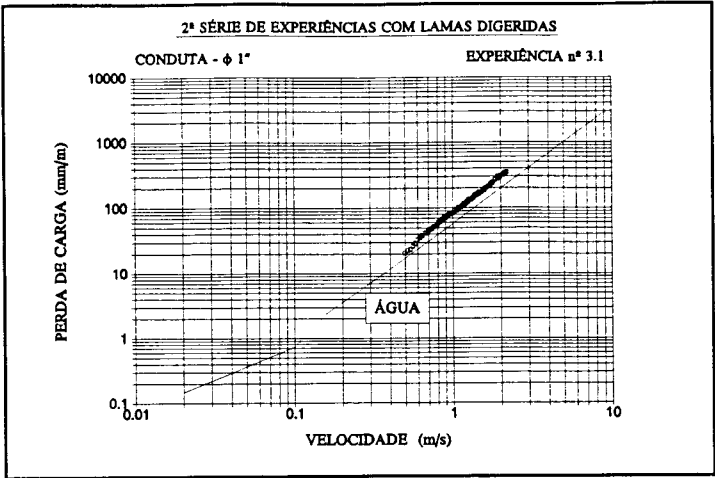


figura A.28

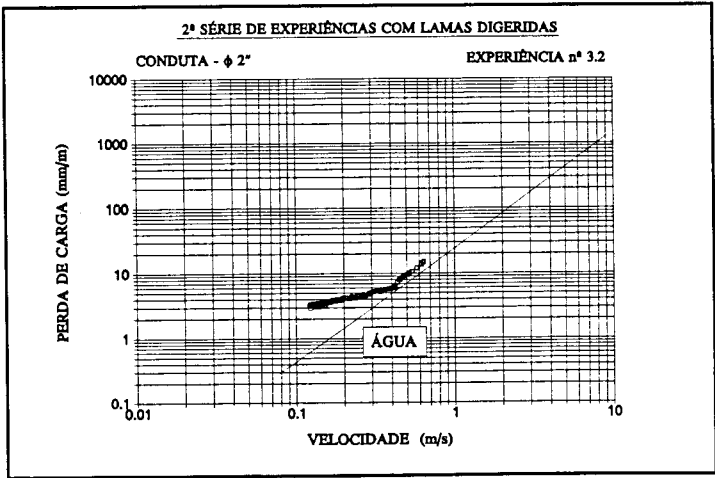


figura A.29

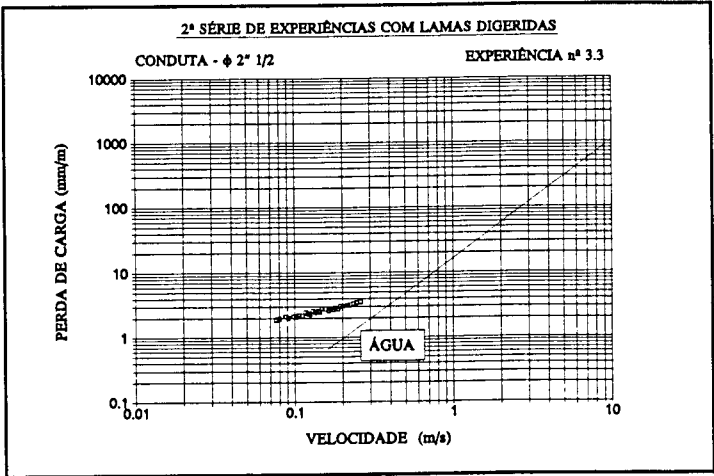


figura A.30

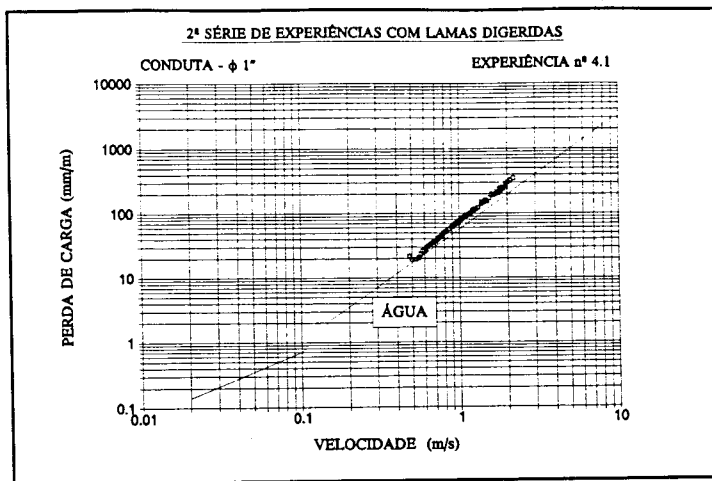


figura A.31

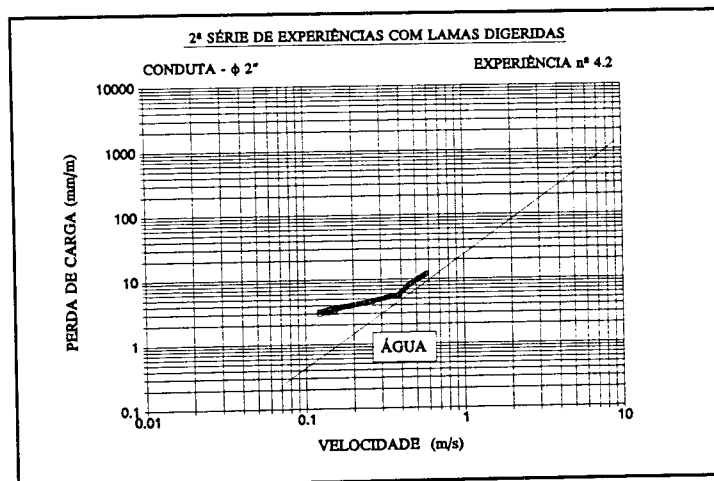


figura A.32

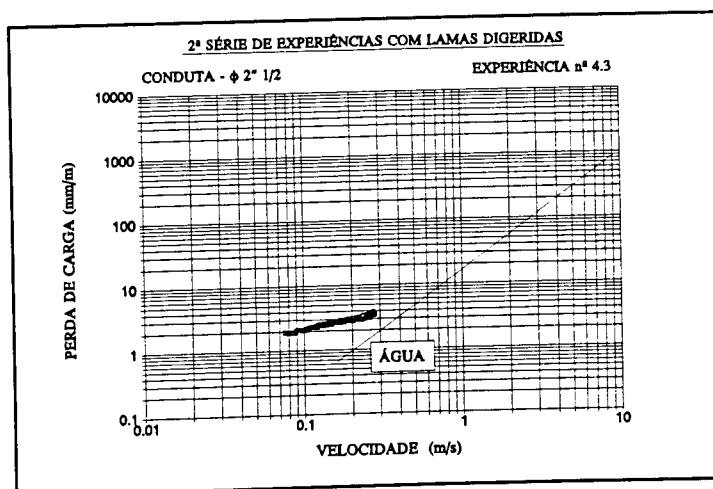


figura A.33



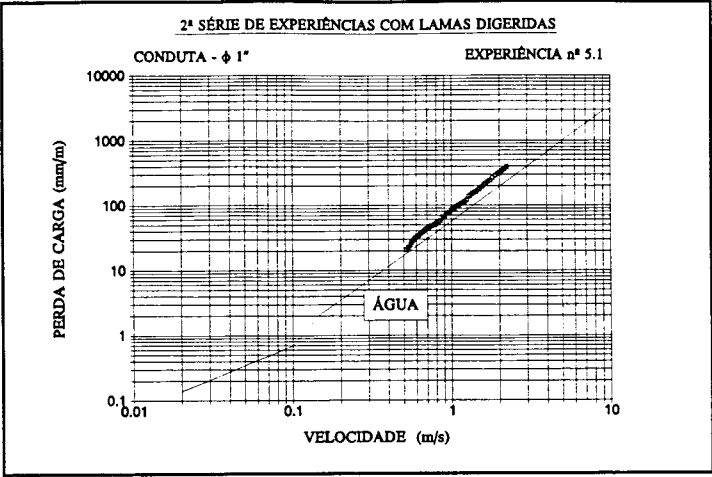


figura A.34

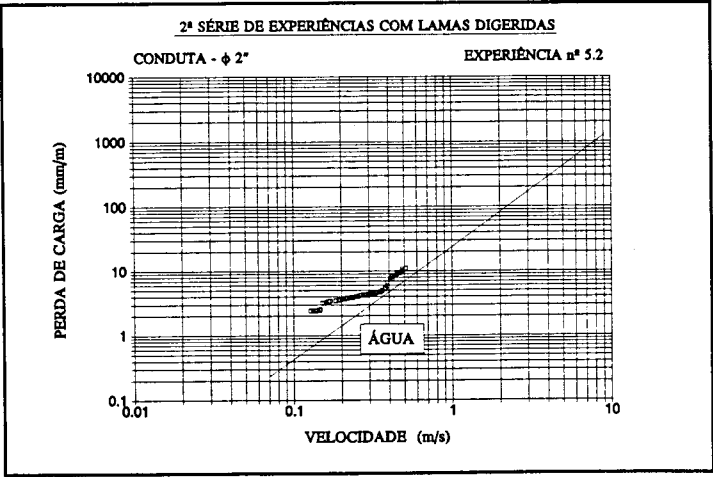


figura A.35

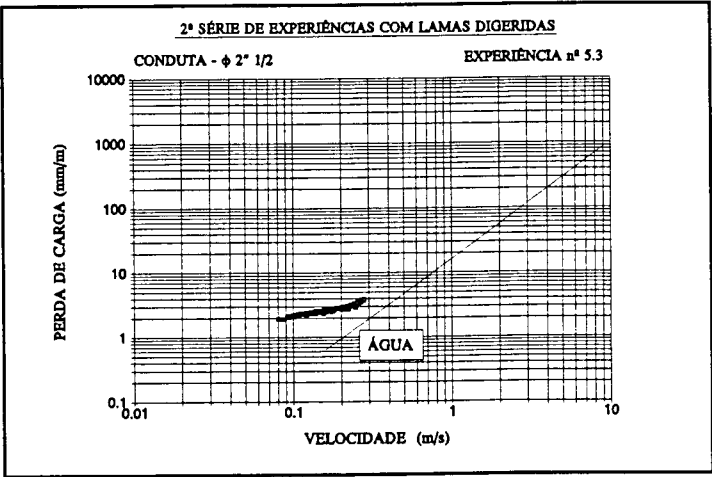


figura A.36

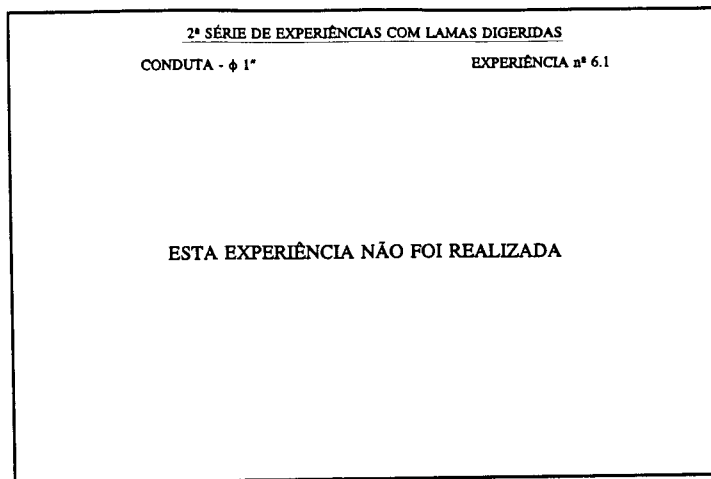


figura A.37

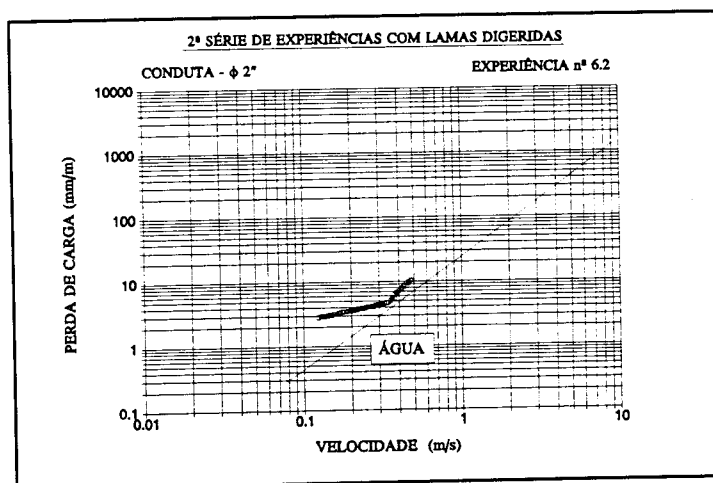


figura A.38

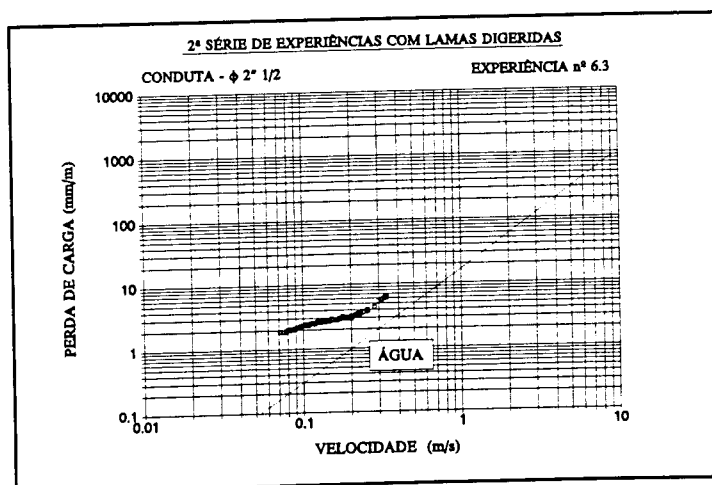


figura A.39

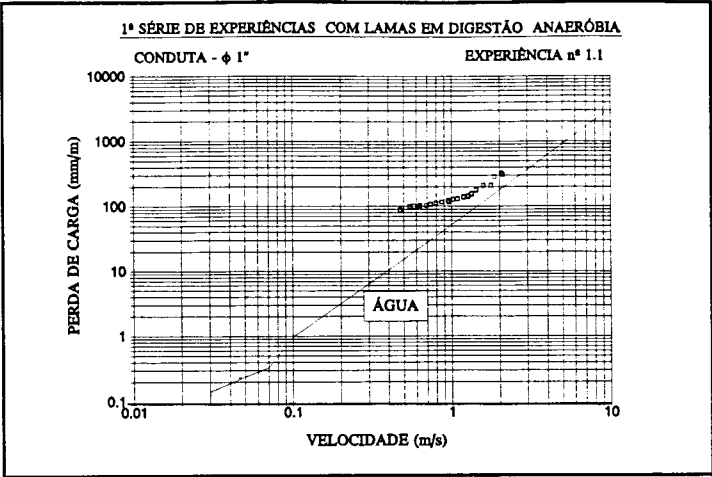


figura A.40

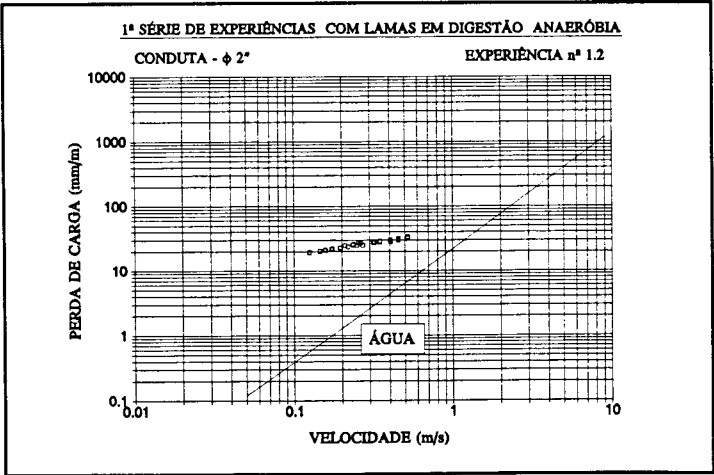


figura A.41

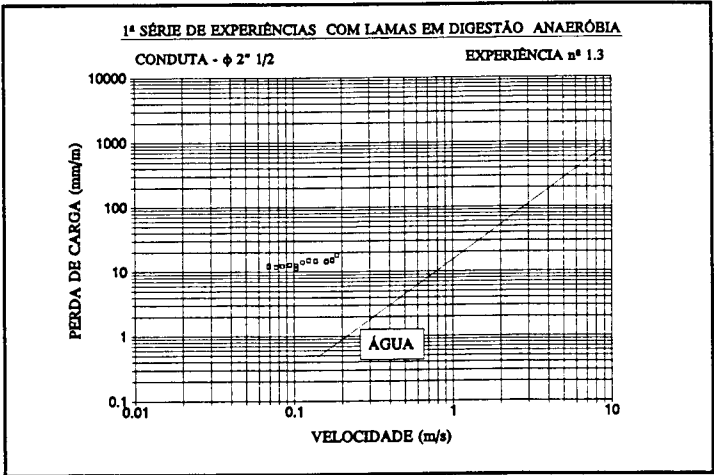


figura A.42

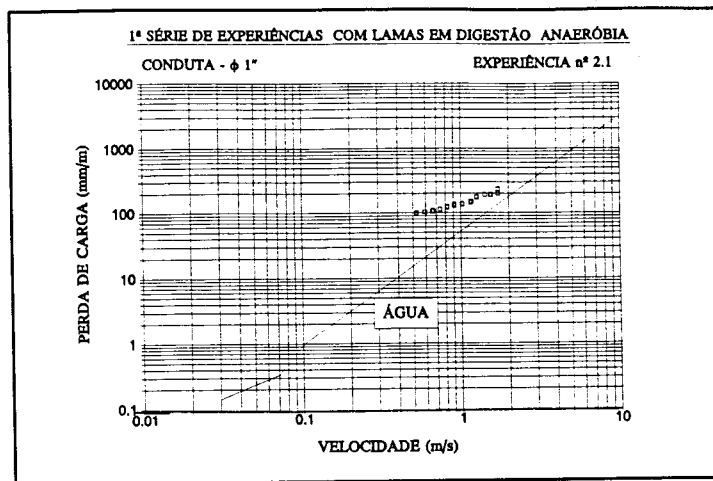


figura A.43

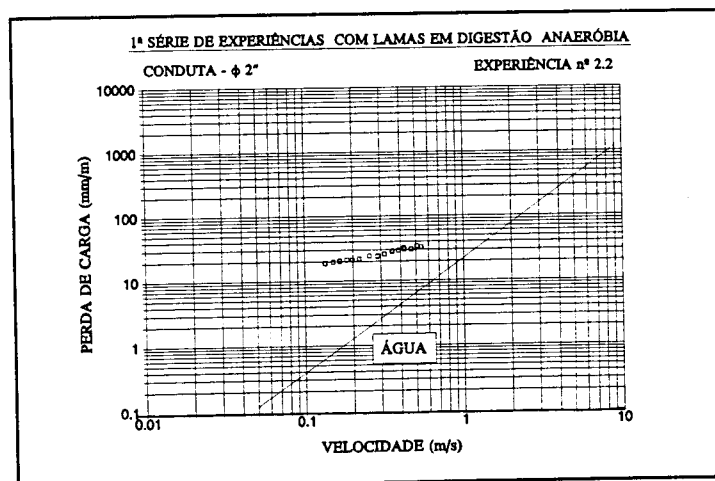


figura A.44

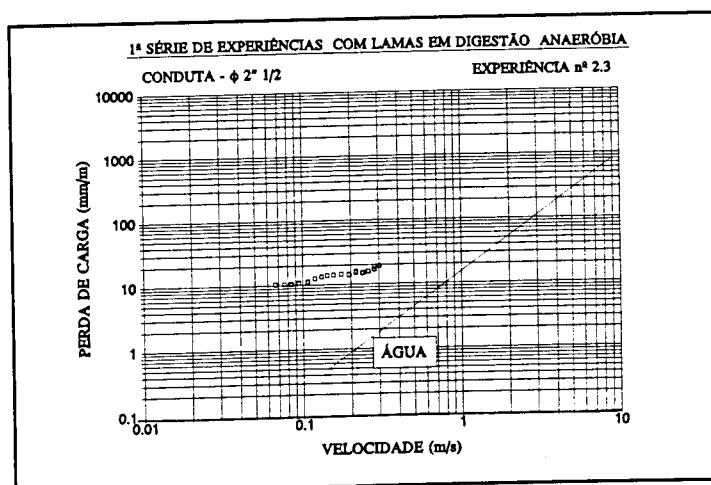


figura A.45

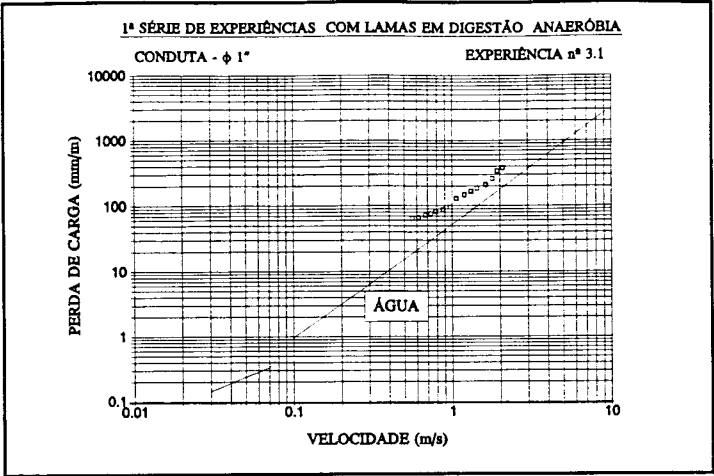


figura A.46

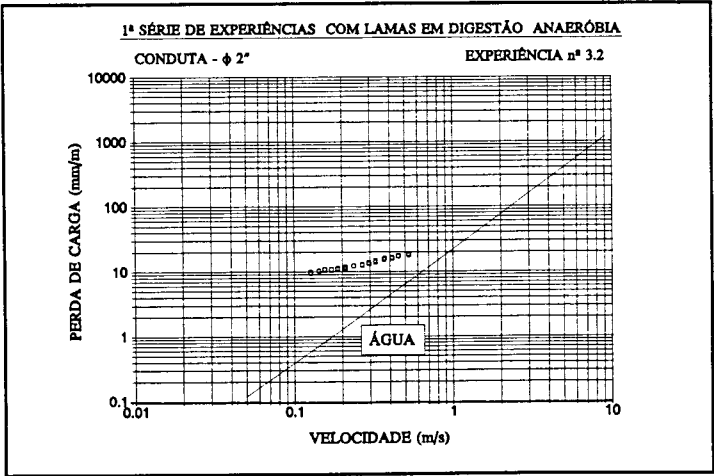


figura A.47

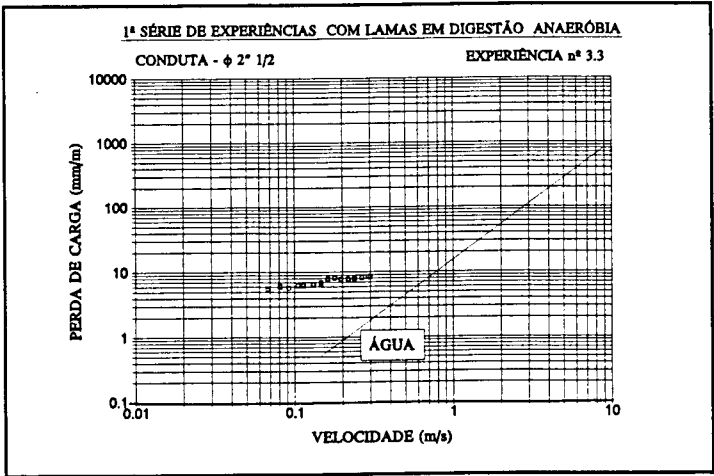


figura A.48

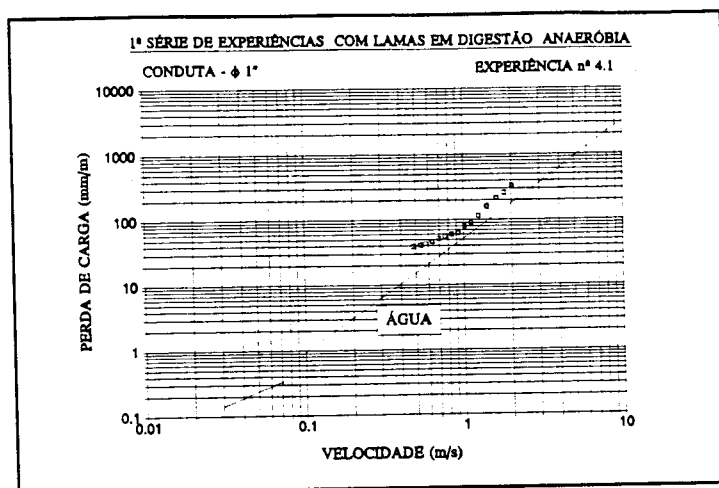


figura A.49

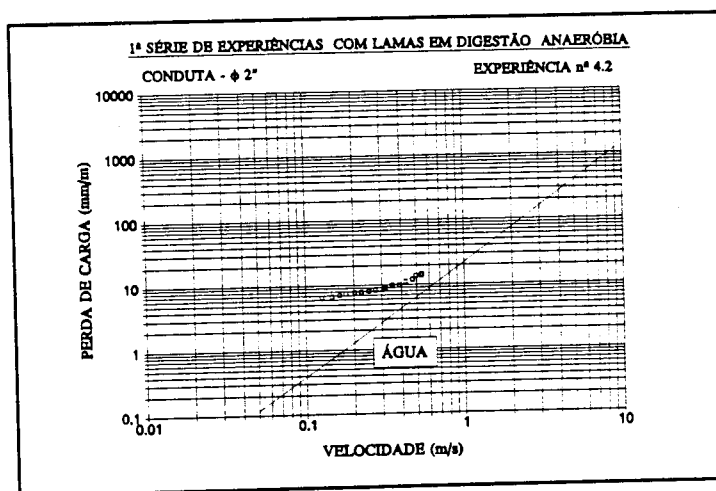


figura A.50

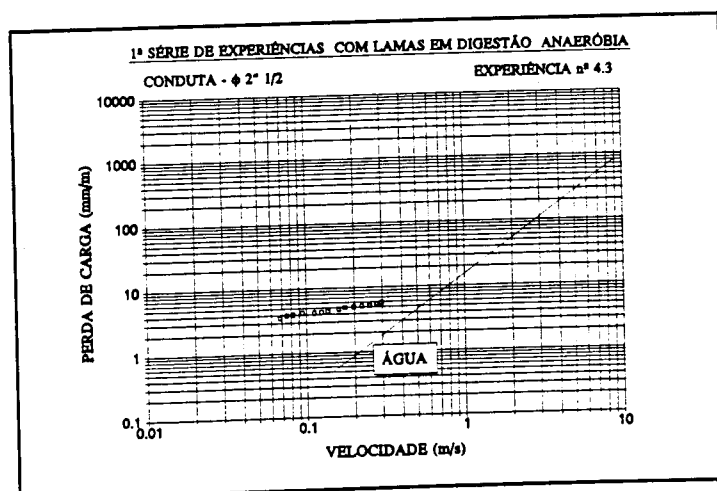


figura A.51

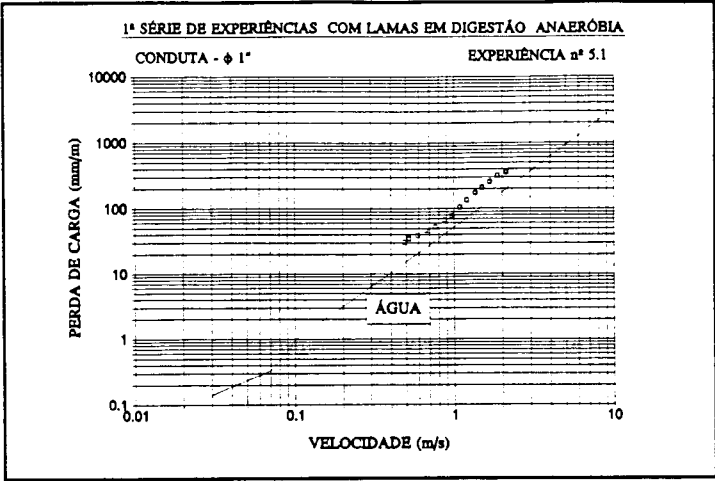


figura A.52

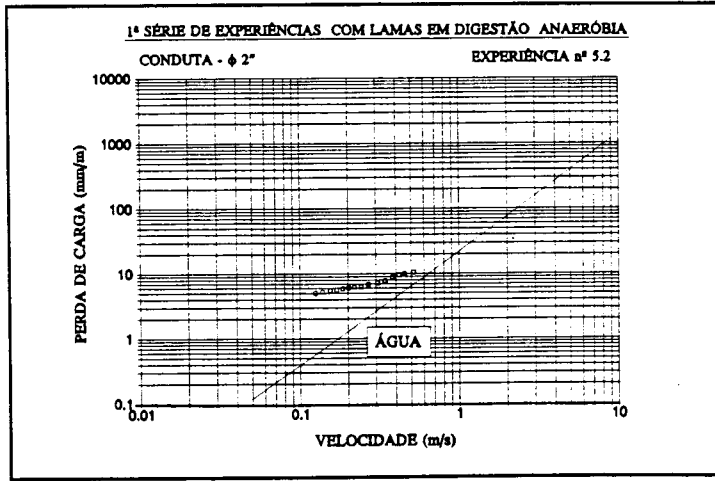


figura A.53

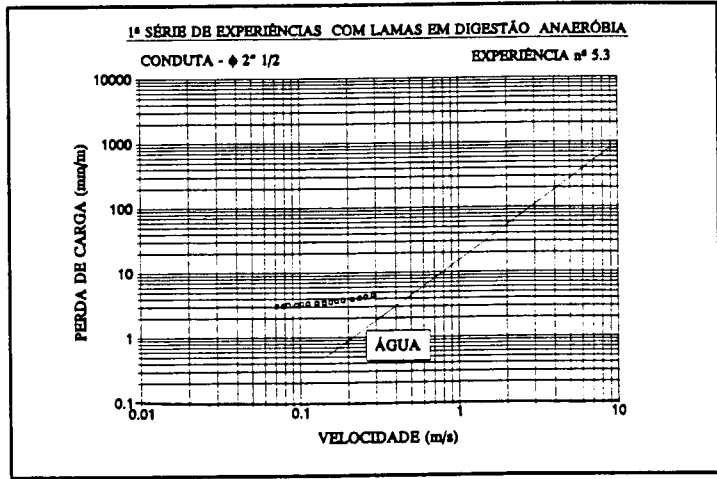


figura A.54



figura A.55

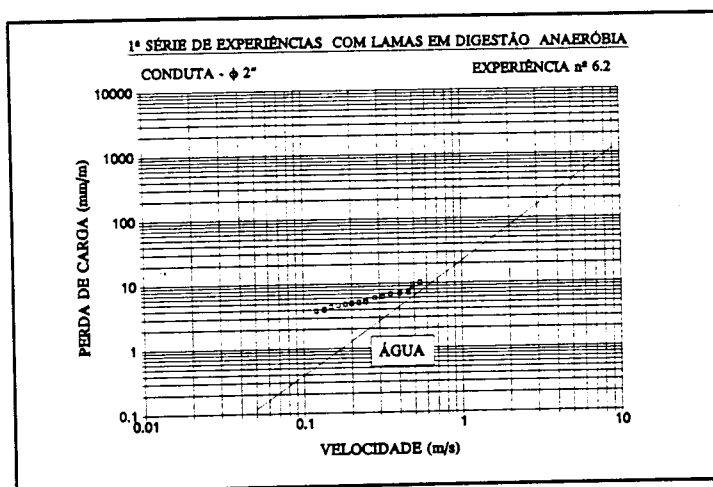


figura A.56

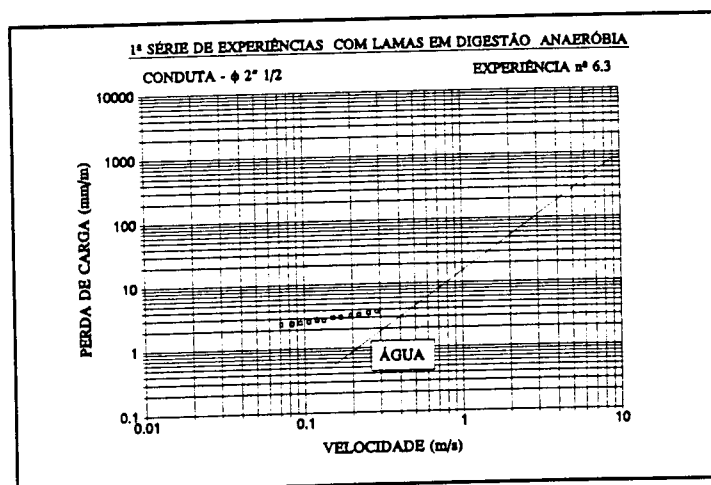


figura A.57



figura A.58

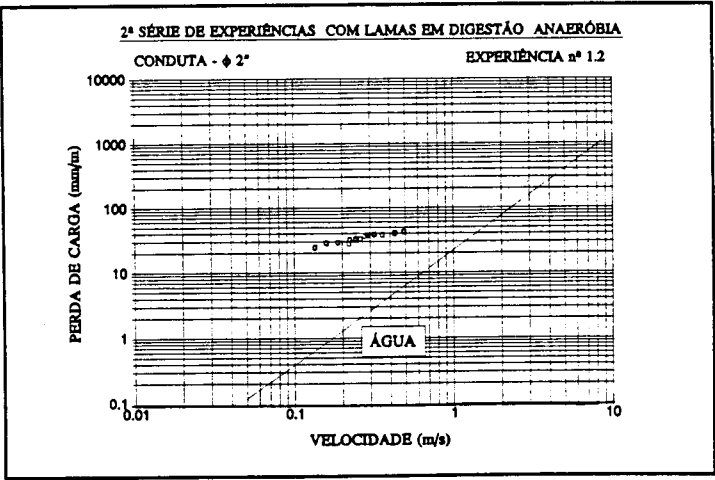


figura A.59

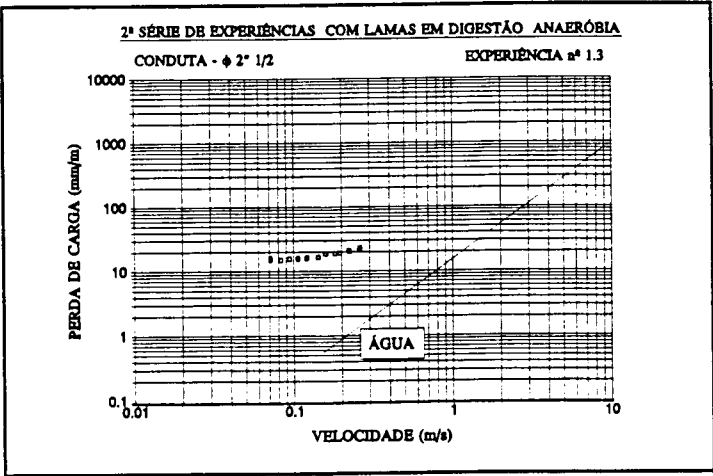


figura A.60

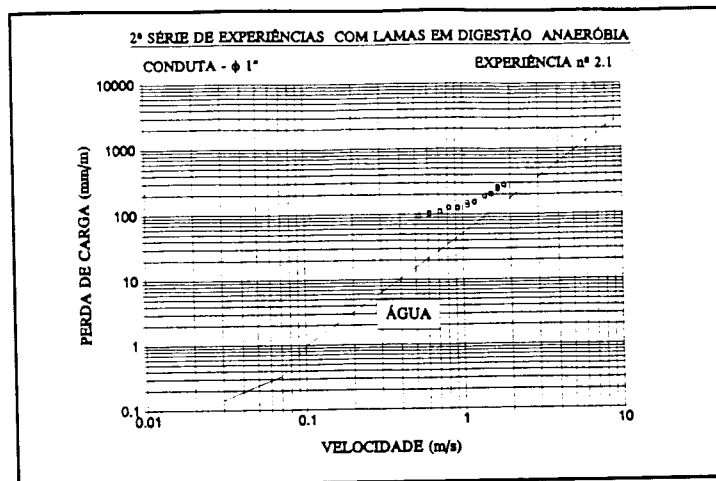


figura A.61

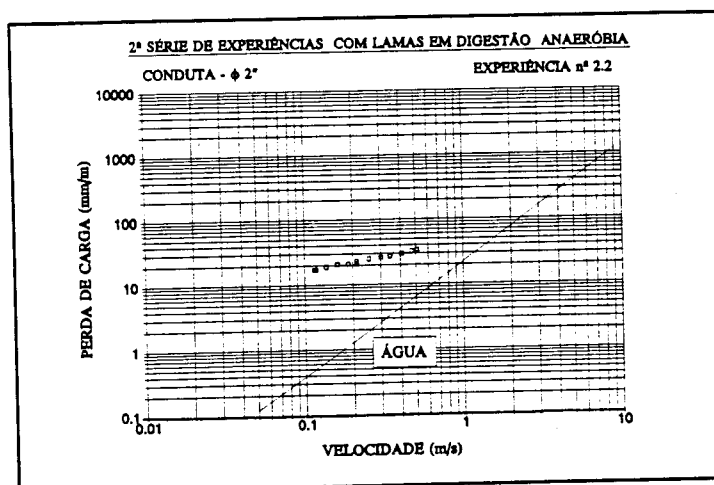


figura A.62

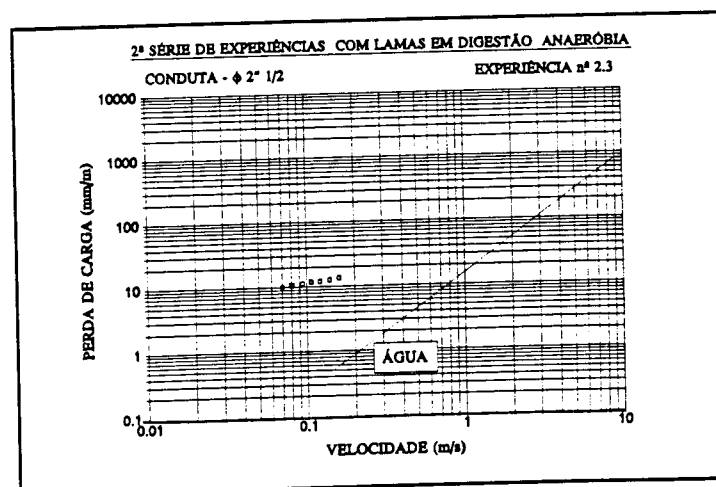


figura A.63

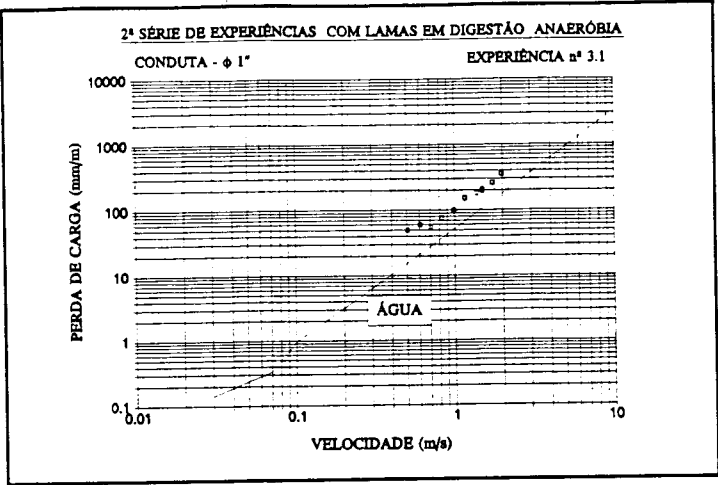


figura A.64

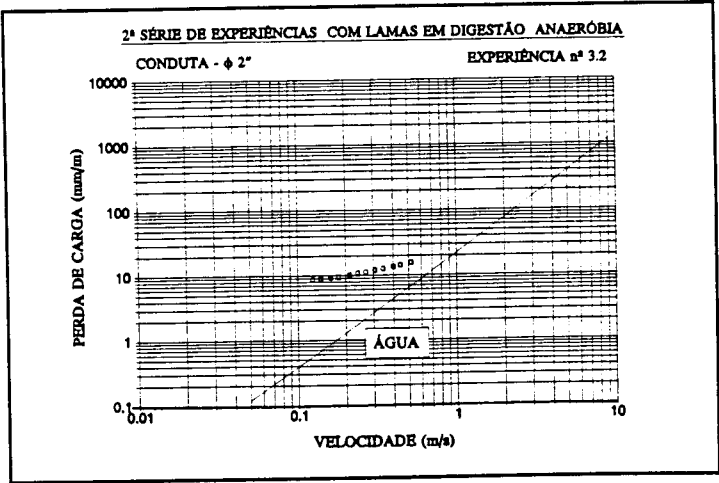


figura A.65

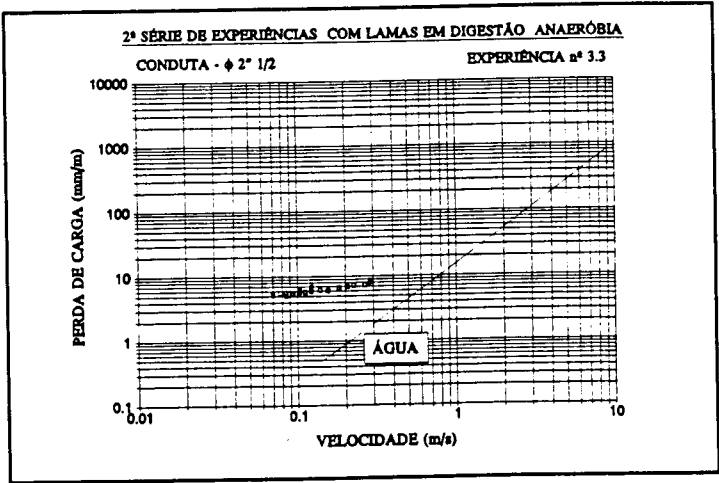


figura A.66

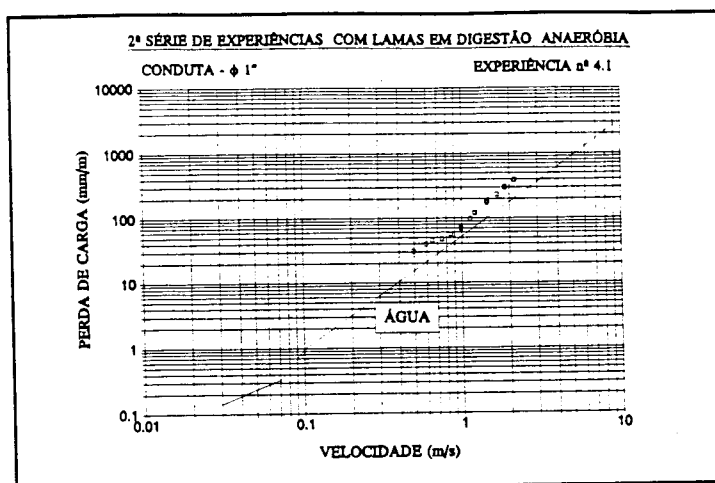


figura A.67

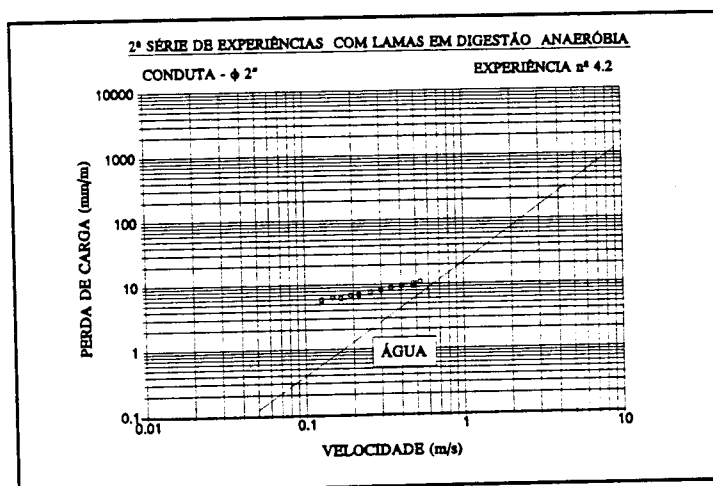


figura A.68

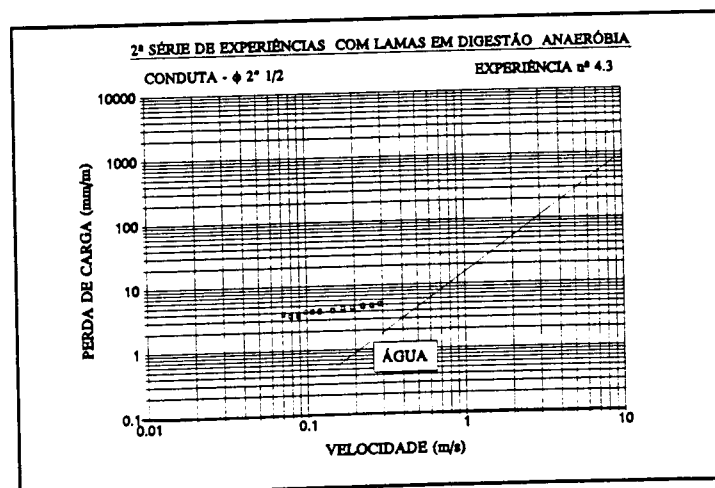


figura A.69

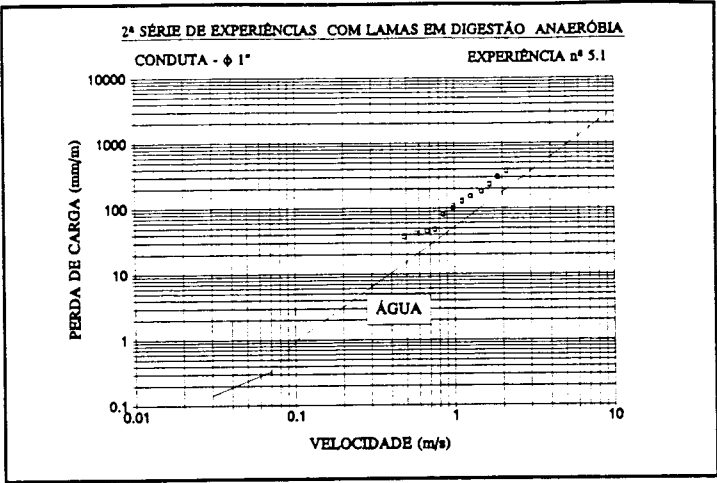


figura A.70

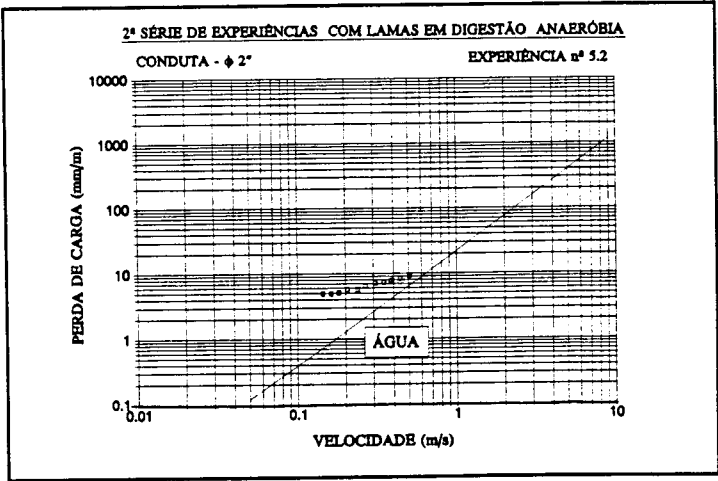


figura A.71

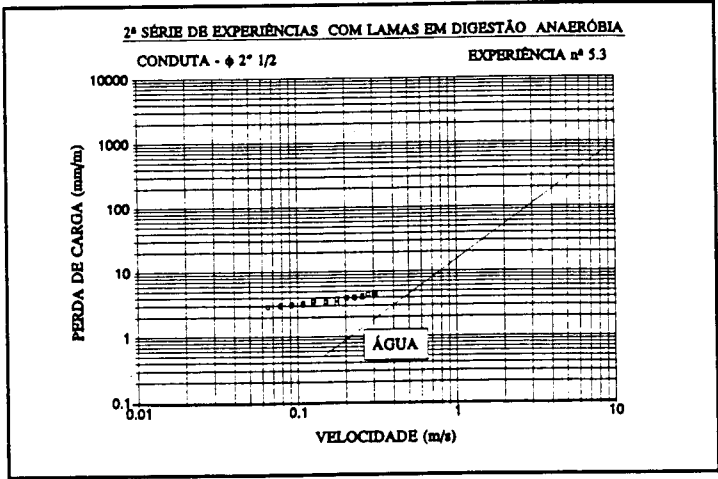


figura A.72

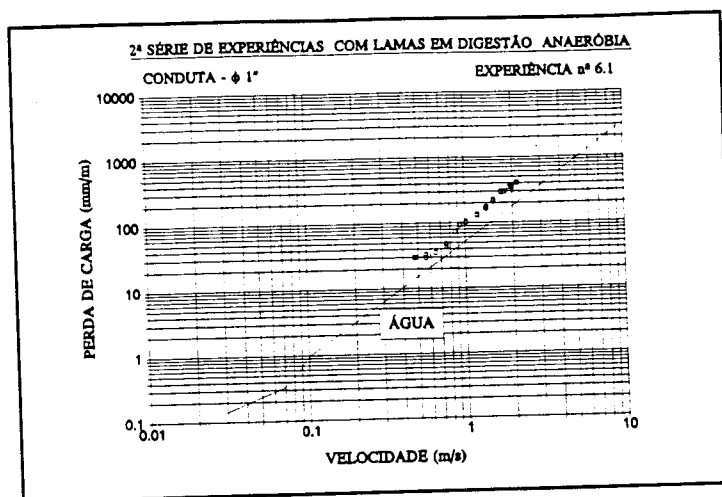


figura A.73

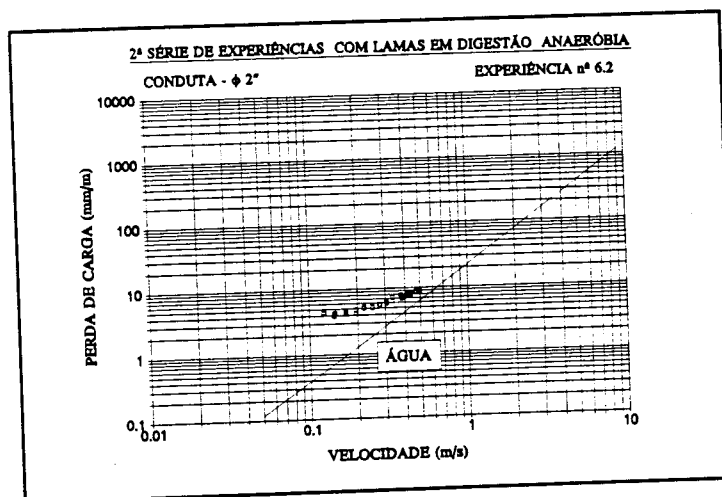


figura A.74

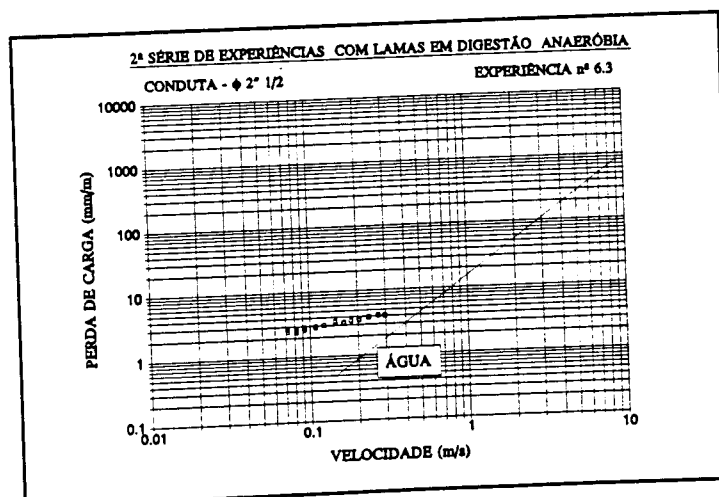


figura A.75

ANEXO B

RESULTADOS OBTIDOS NOS ESTUDOS REOLÓGICOS

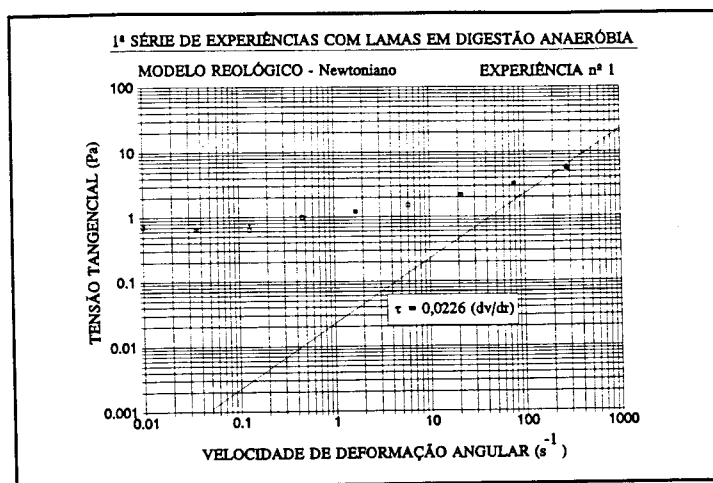


figura B.1

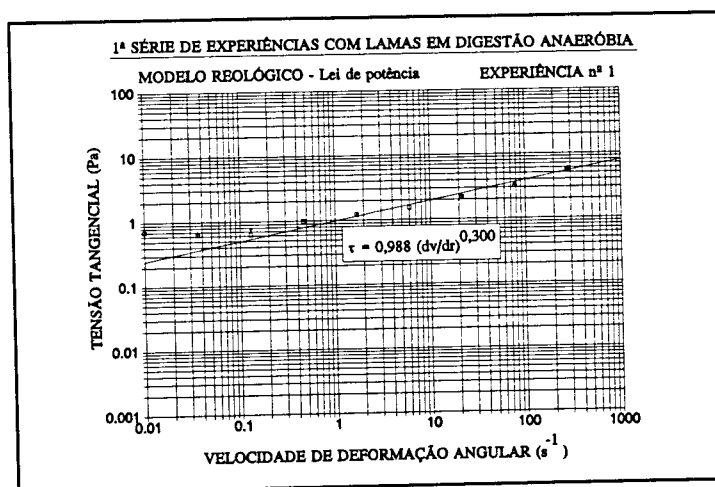


figura B.2

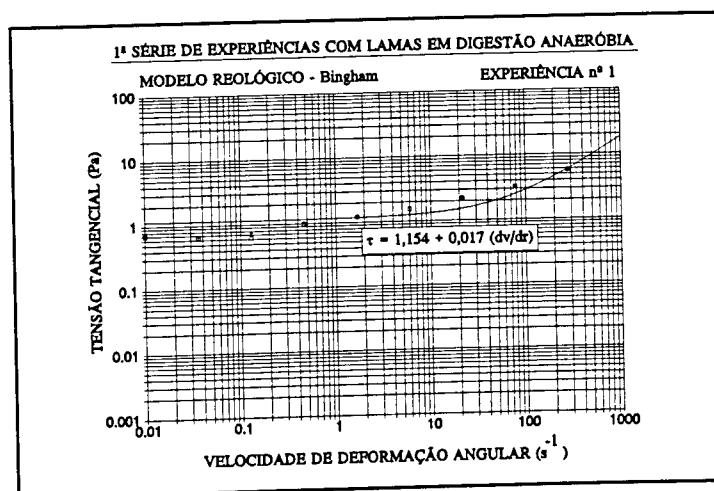


figura B.3

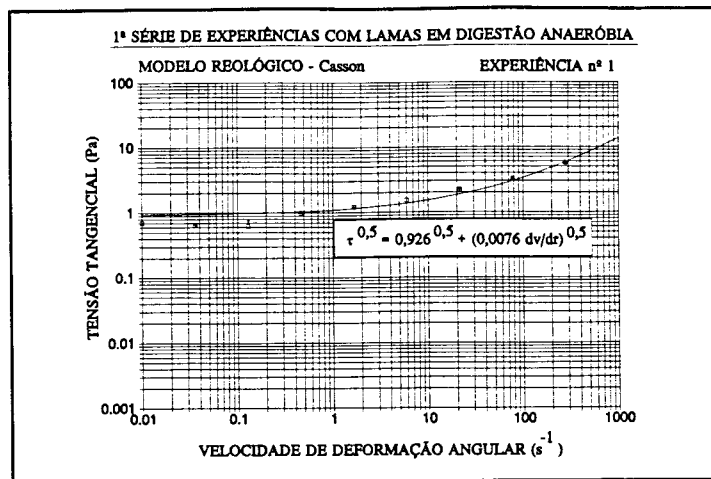


figura B.4

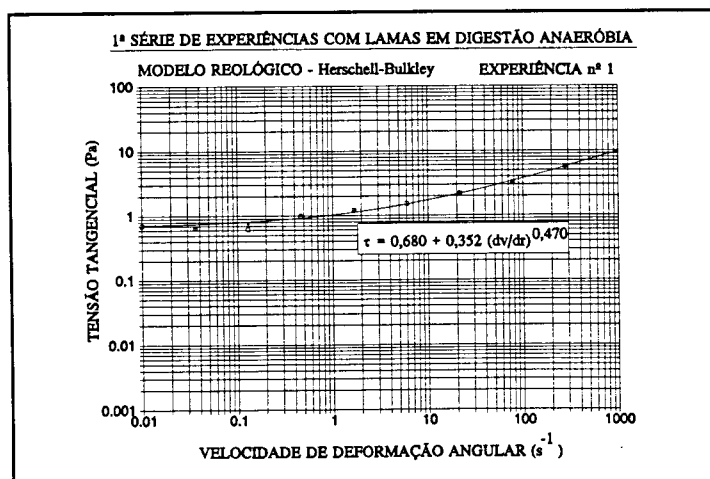


figura B.5

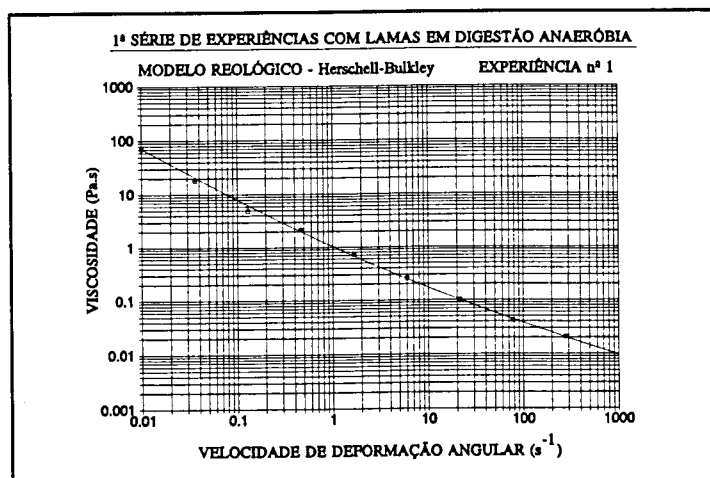


figura B.6

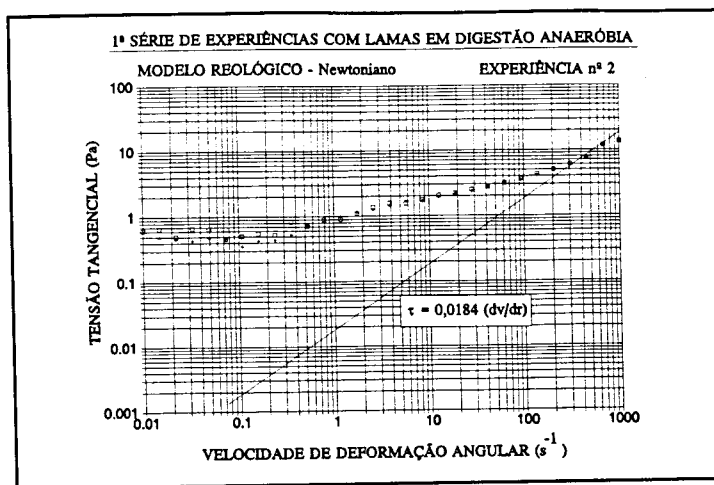


figura B.7

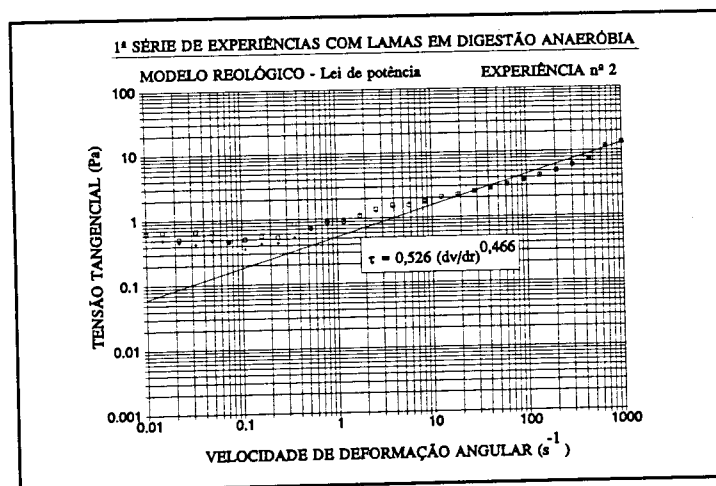


figura B.8

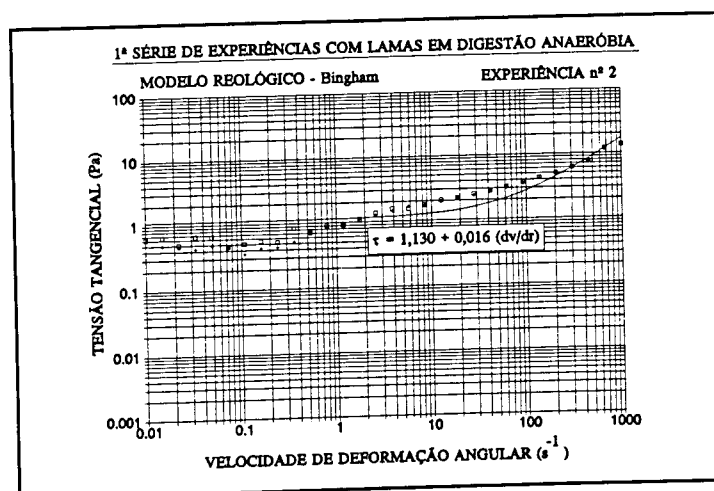


figura B.9

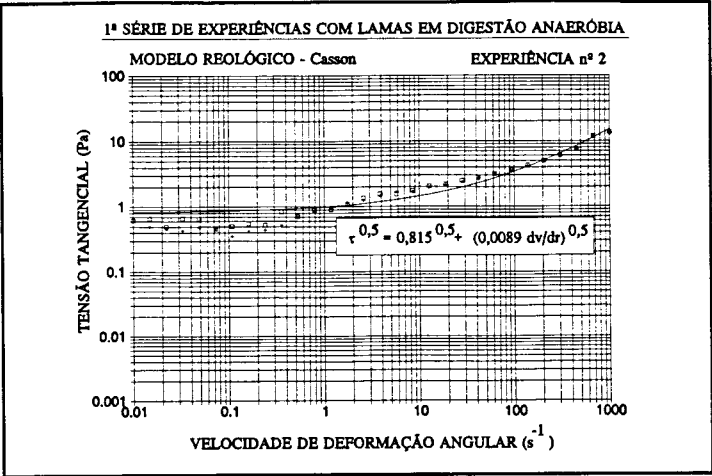


figura B.10

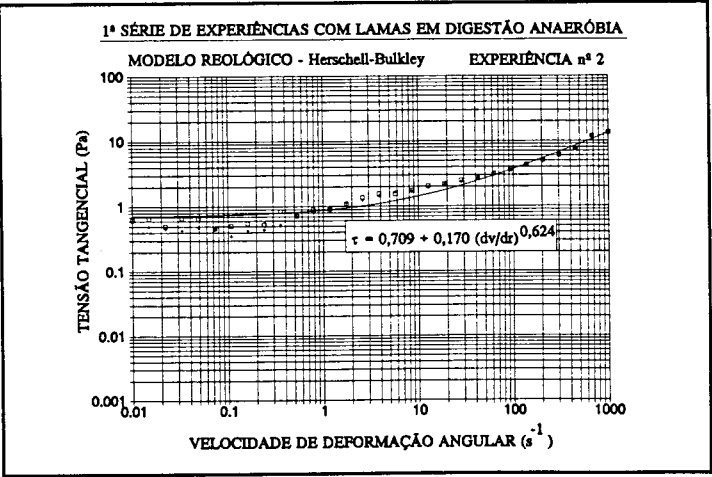


figura B.11

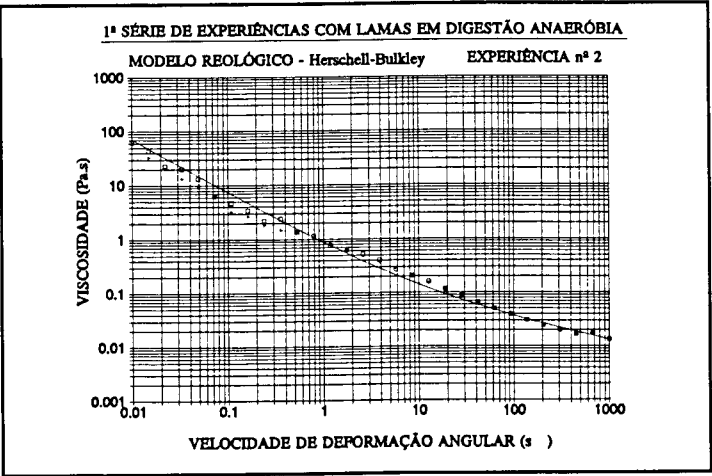


figura B.12

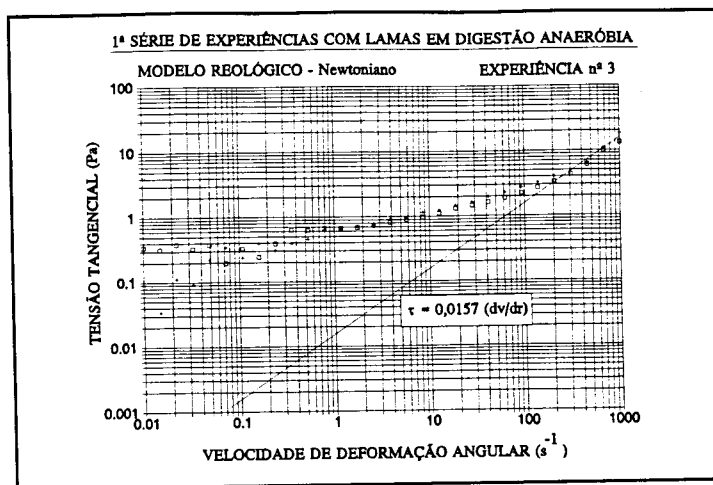


figura B.13

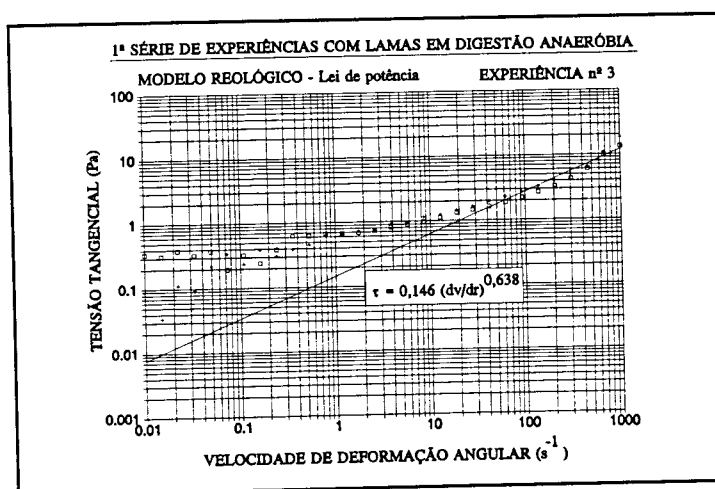


figura B.14

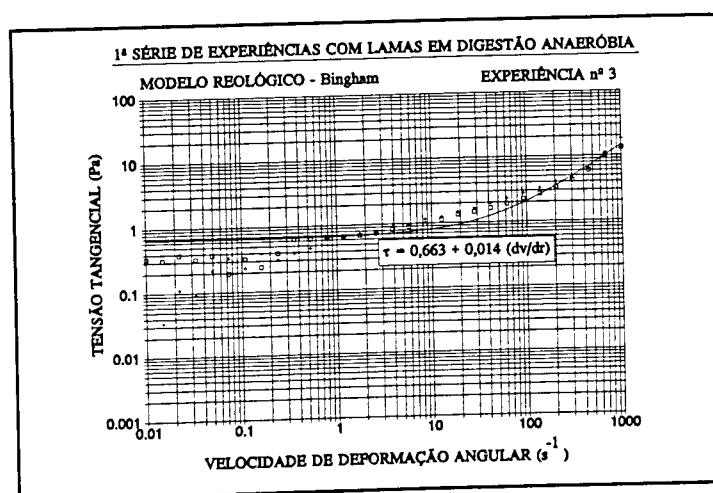


figura B.15

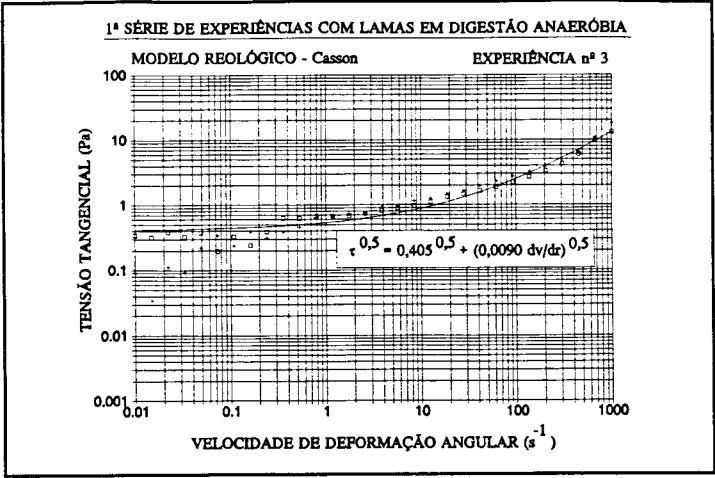


figura B.16

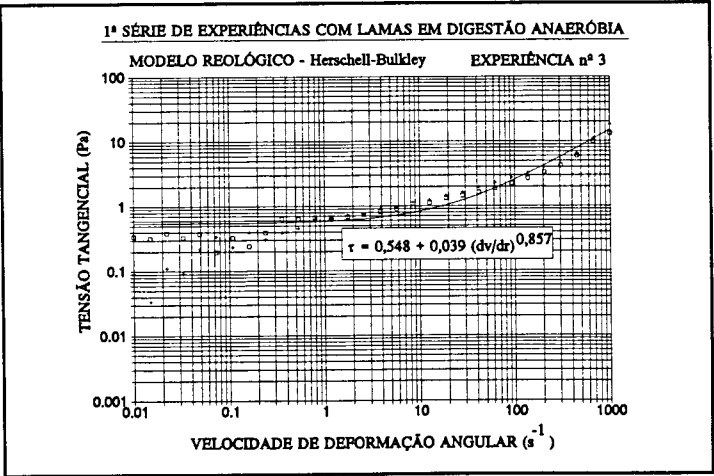


figura B.17

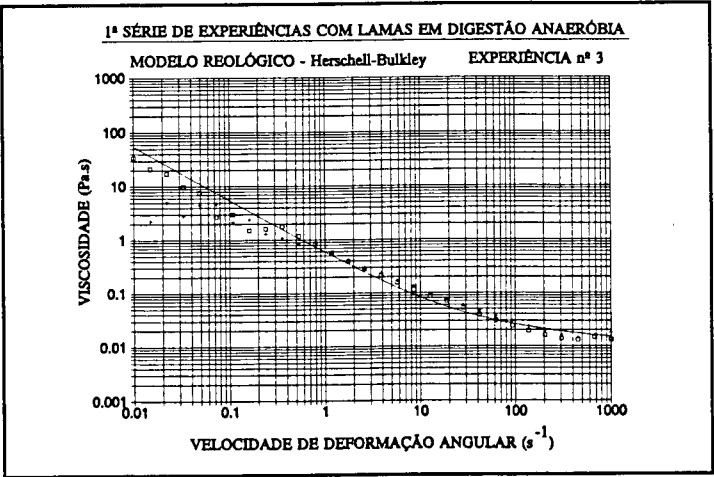


figura B.18

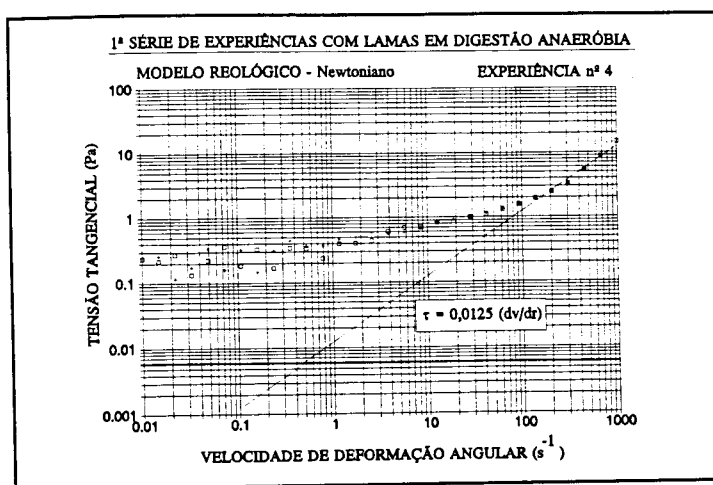


figura B.19

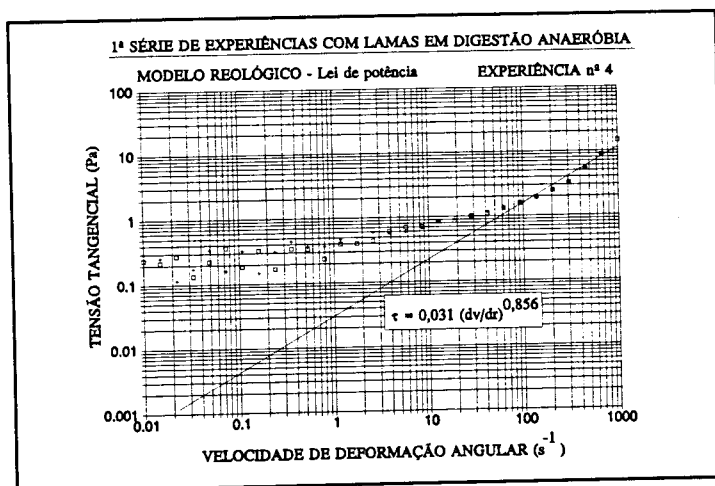


figura B.20



figura B.21

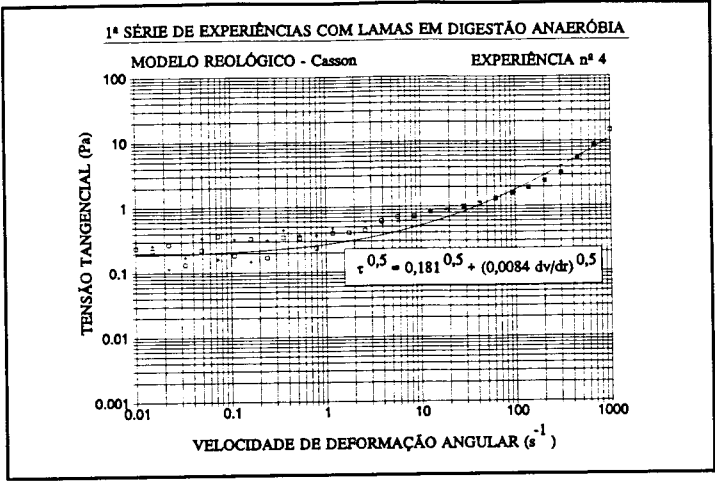


figura B.22

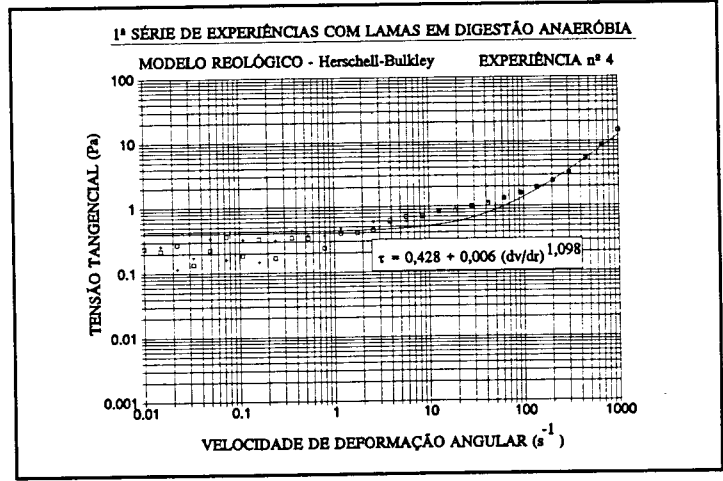


figura B.23



figura B.24

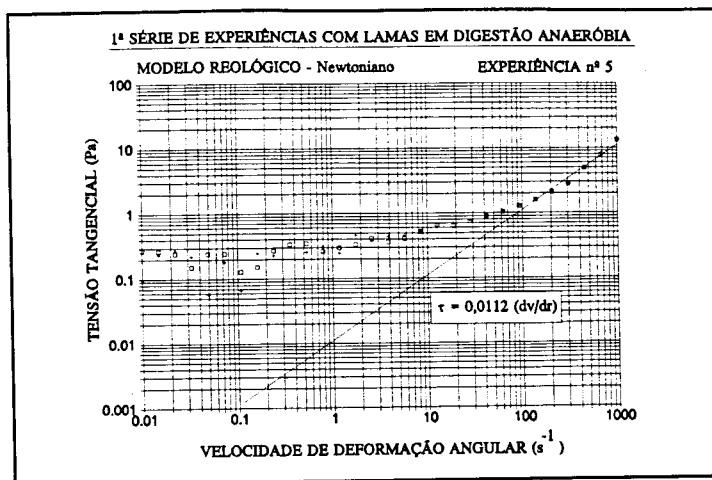


figura B.25

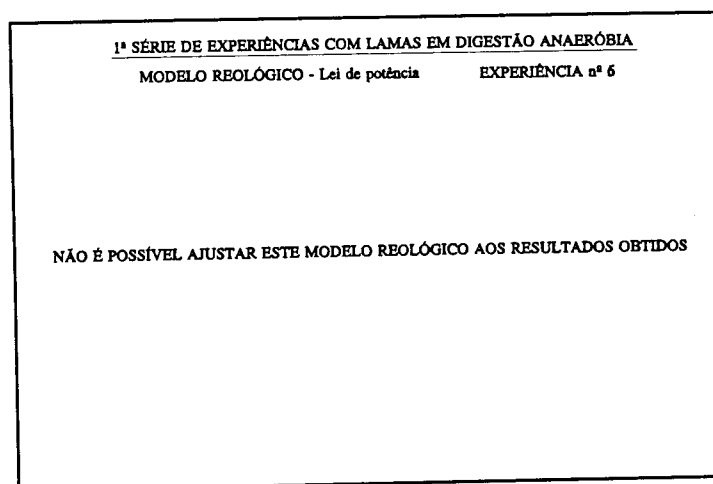


figura B.26

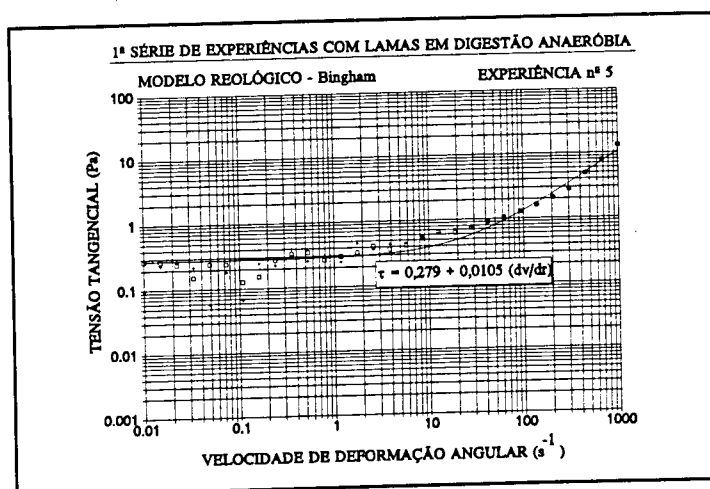


figura B.27

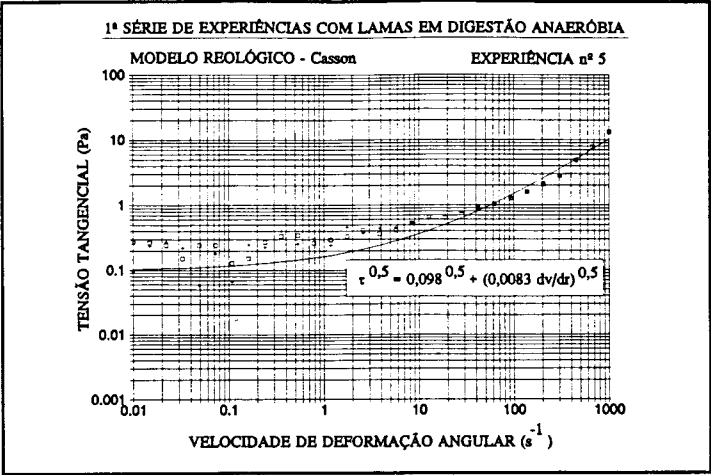


figura B.28

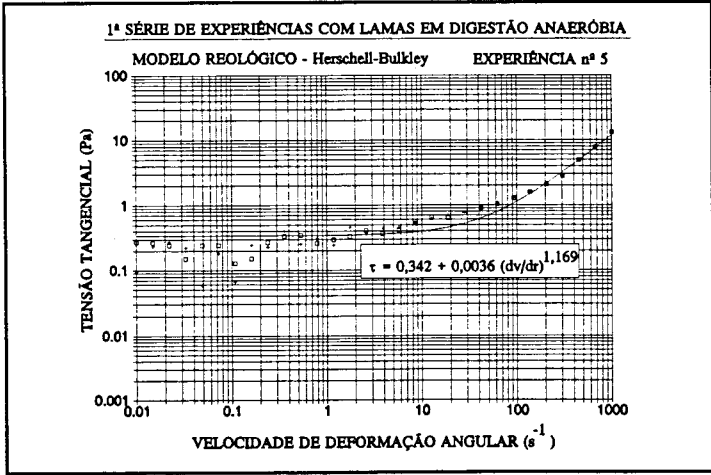


figura B.29



figura B.30

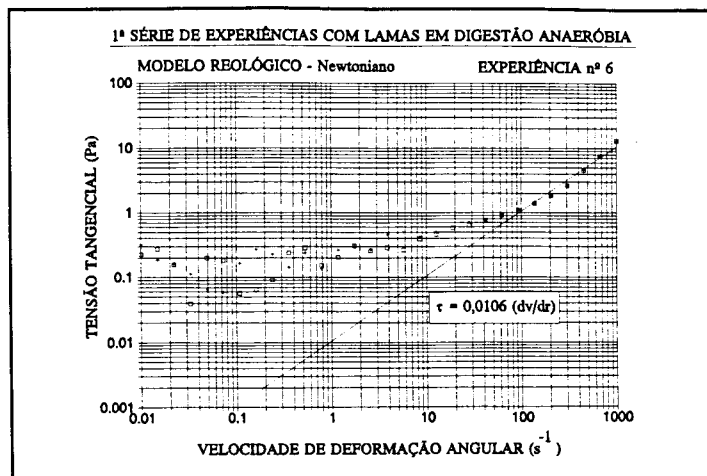


figura B.31

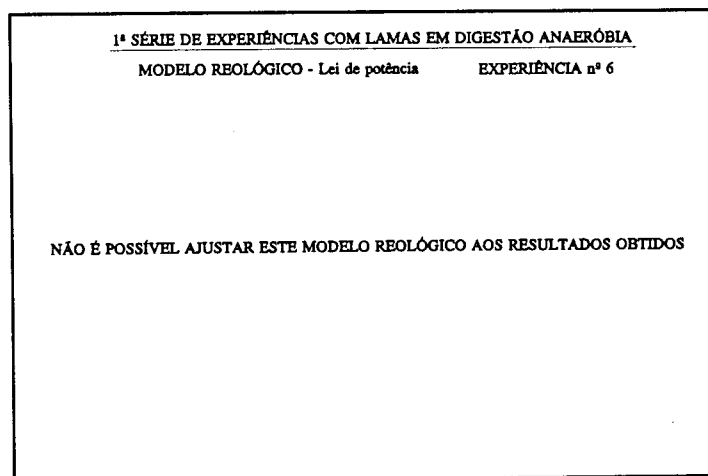


figura B.32



figura B.33

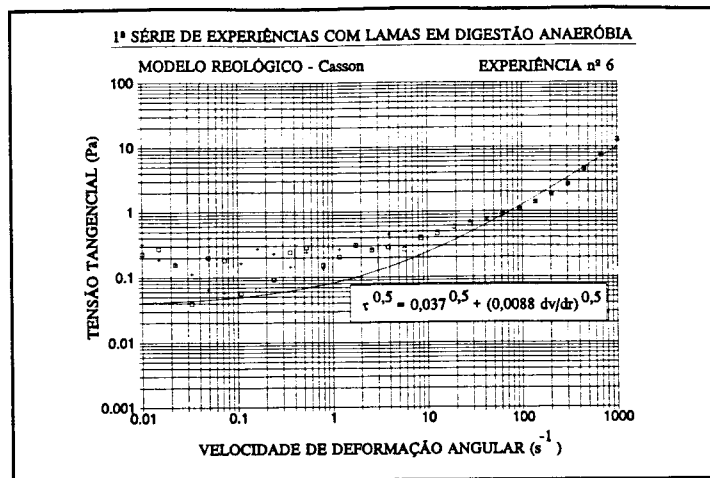


figura B.34

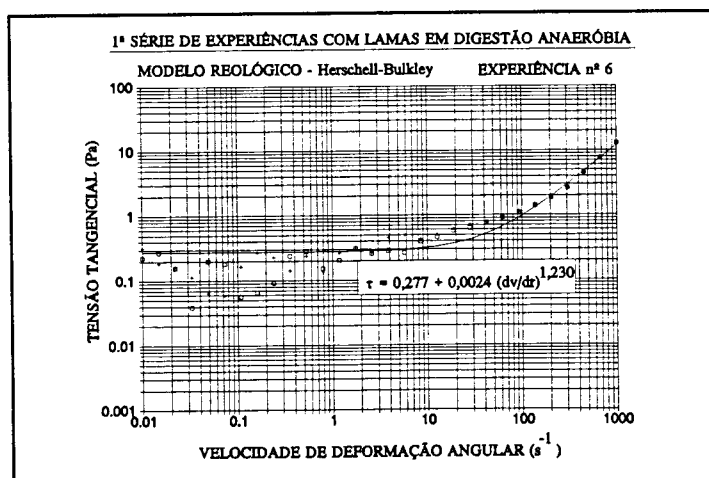


figura B.35



figura B.36

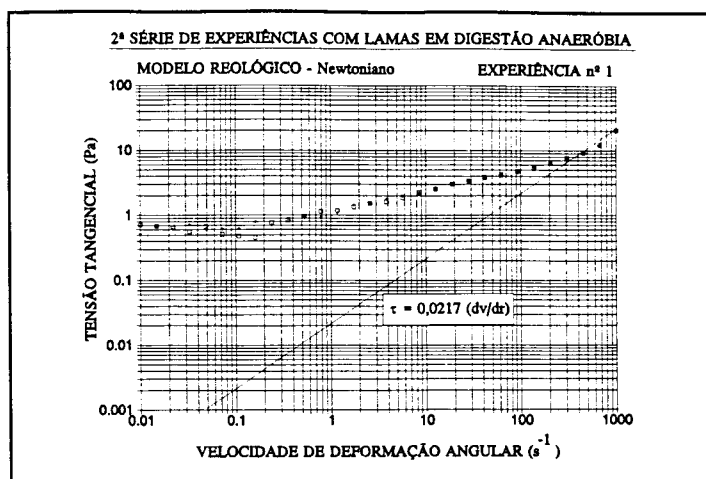


figura B.37

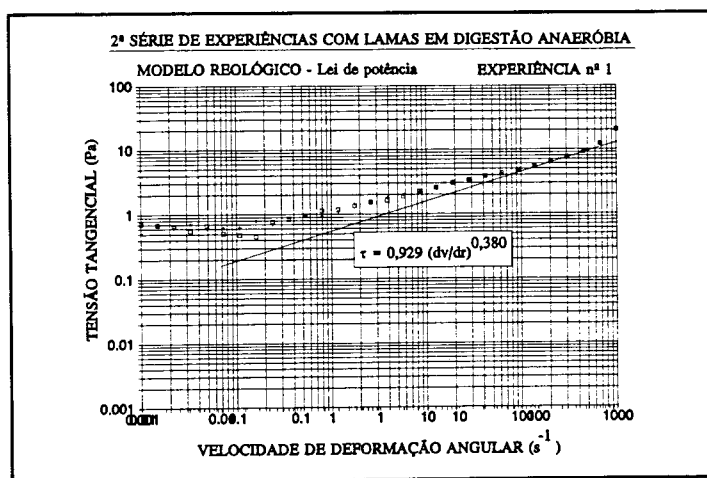


figura B.38

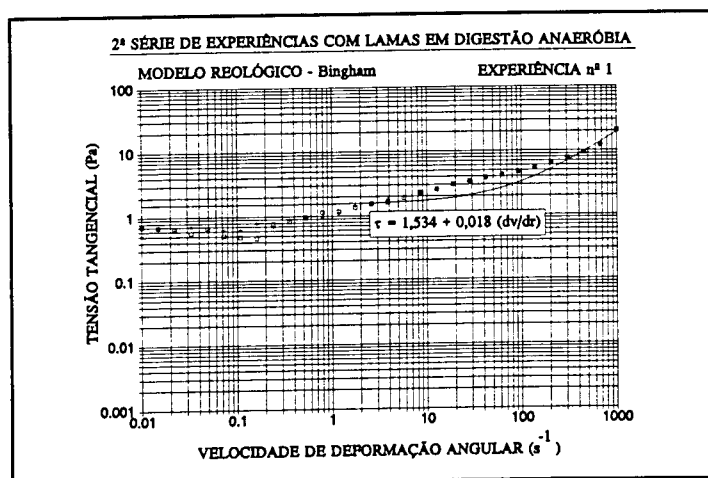


figura B.39

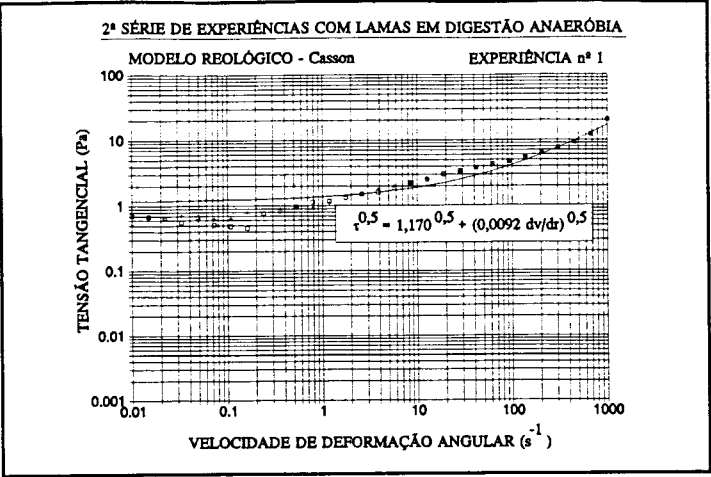


figura B.40

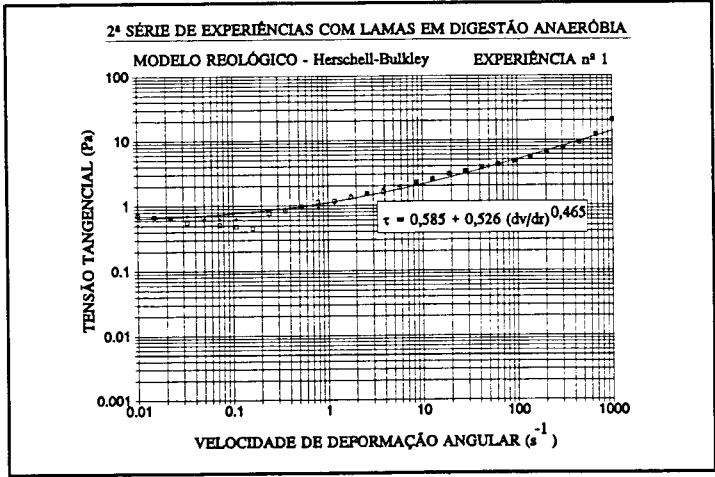


figura B.41

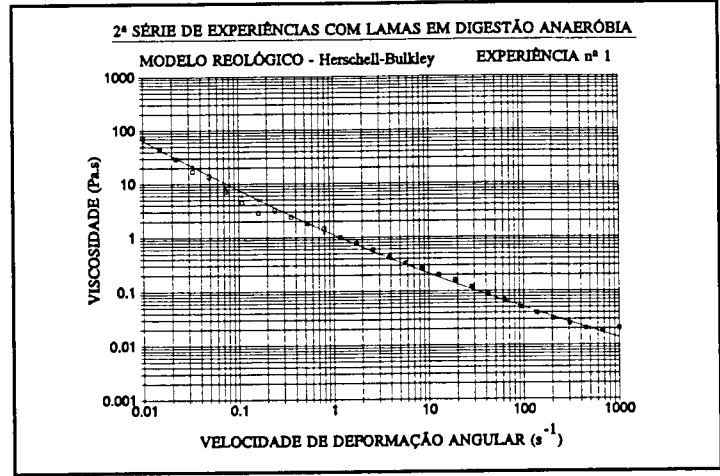


figura B.42

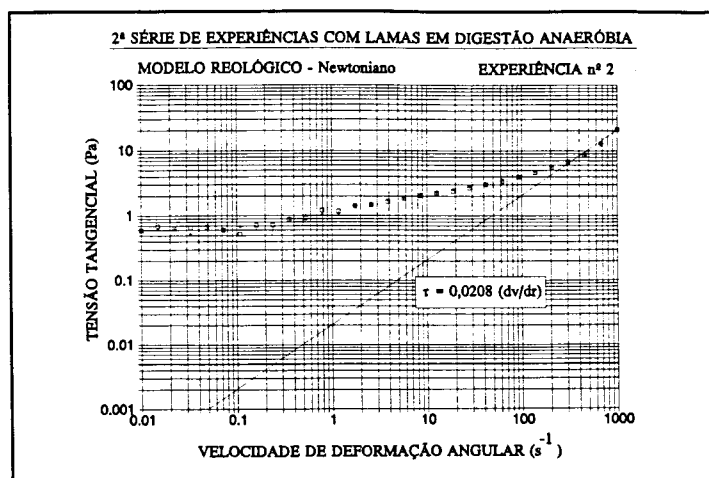


figura B.43

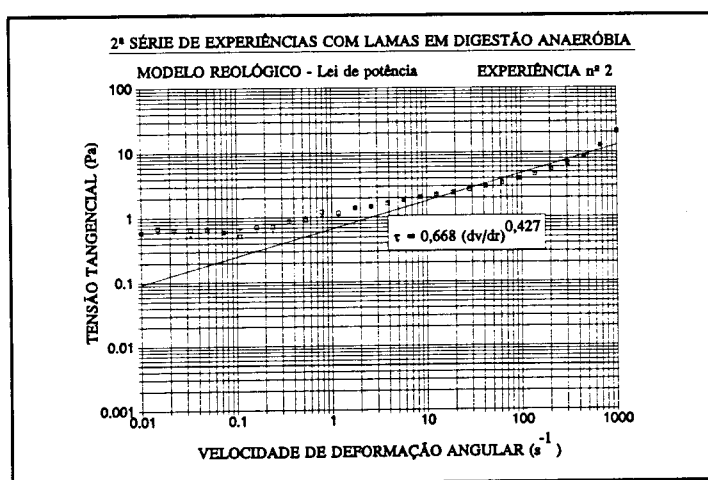


figura B.44



figura B.45

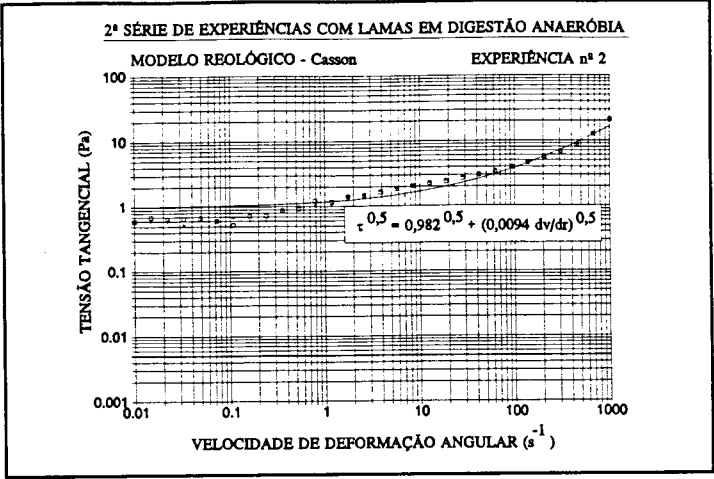


figura B.46

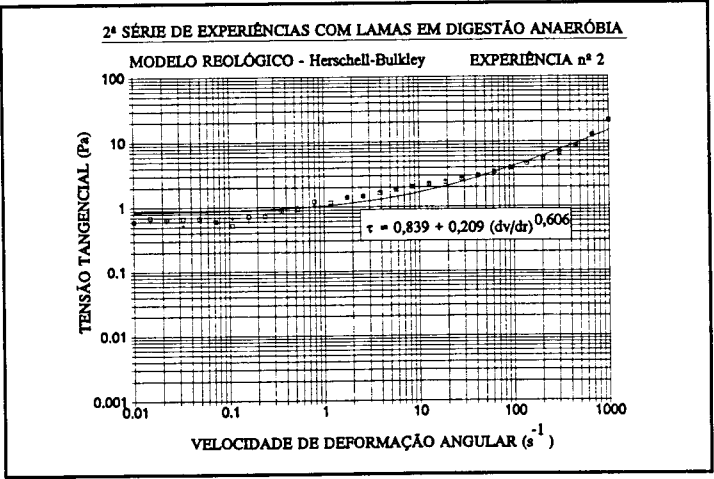


figura B.47

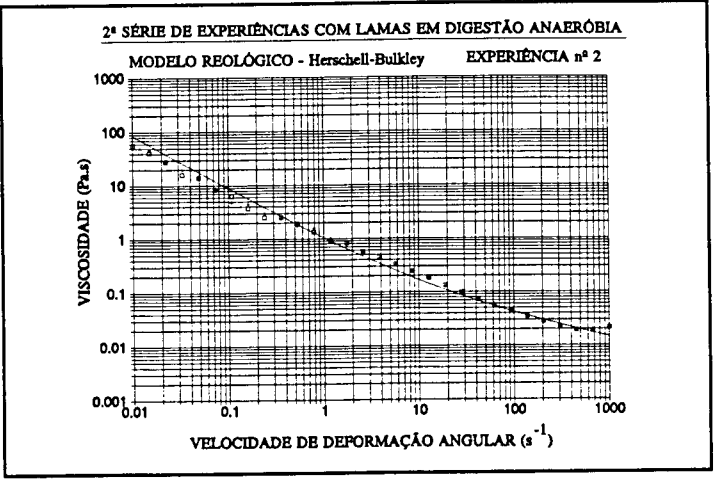


figura B.48

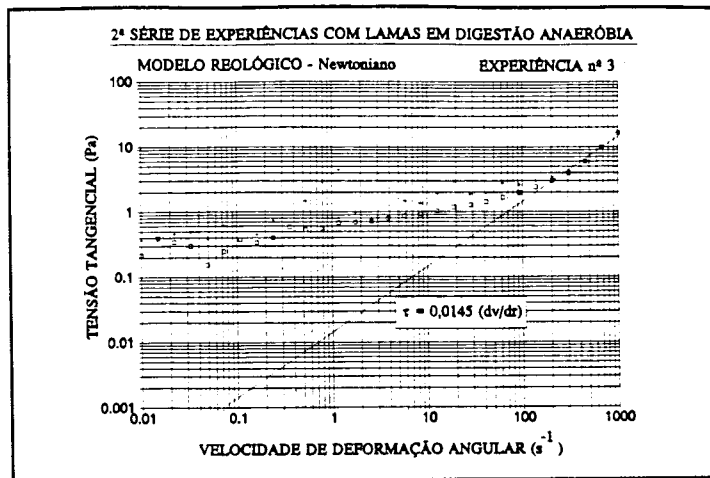


figura B.49

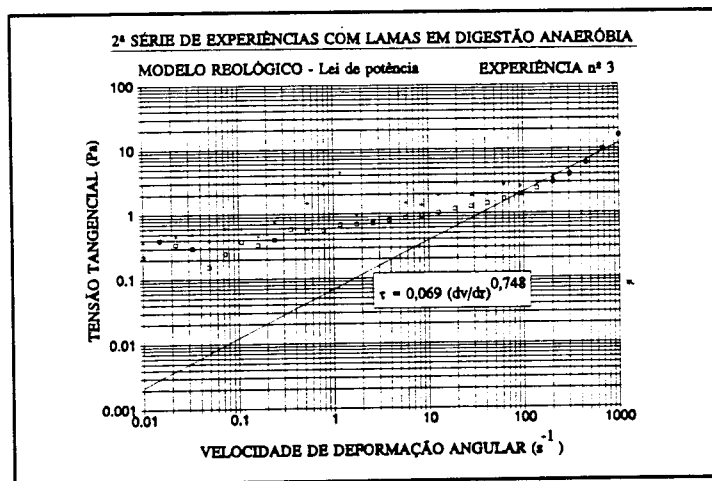


figura B.50



figura B.51



figura B.52

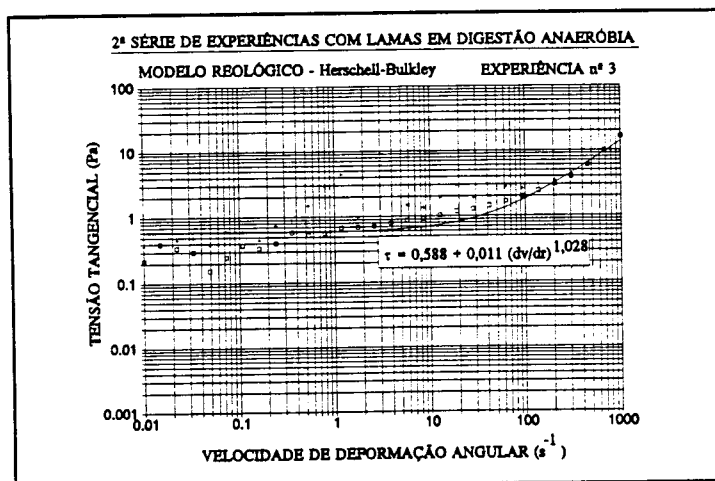


figura B.53



figura B.54

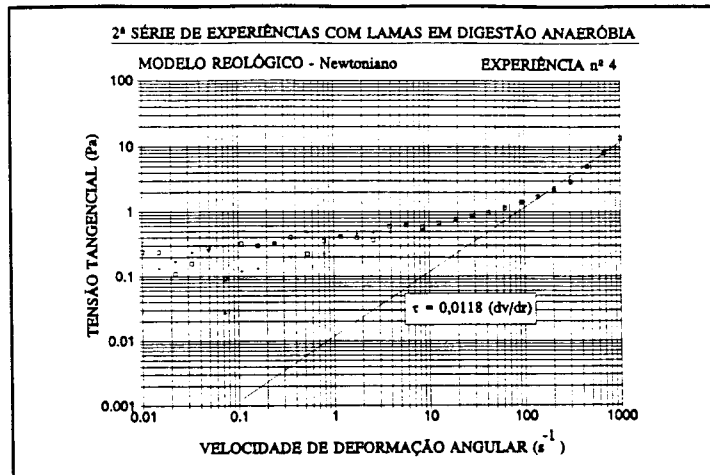


figura B.55

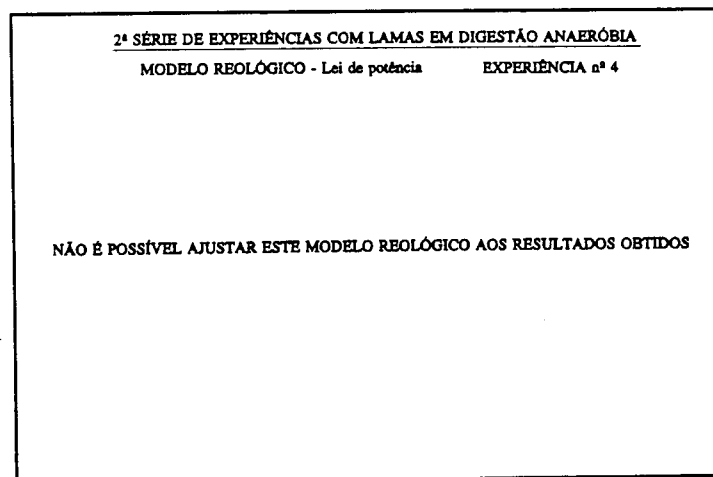


figura B.56

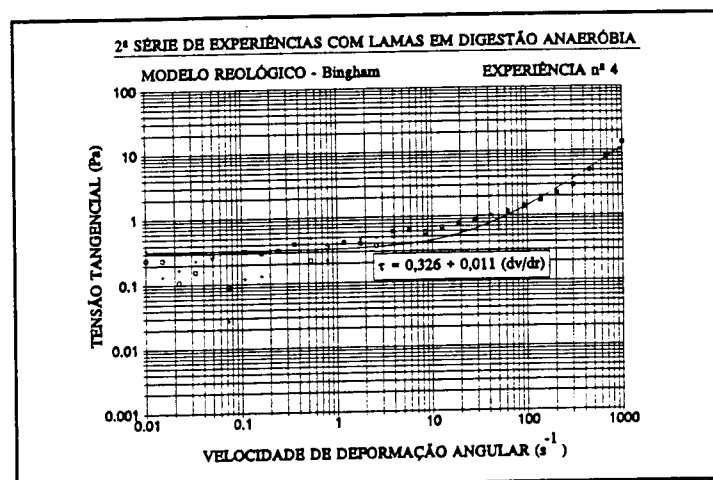


figura B.57

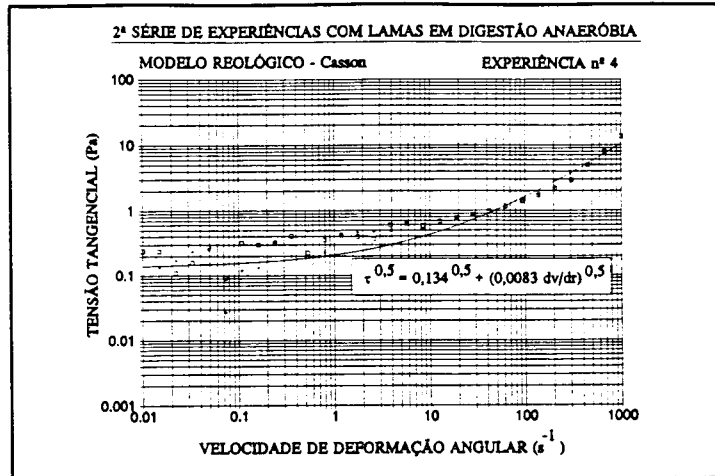


figura B.58

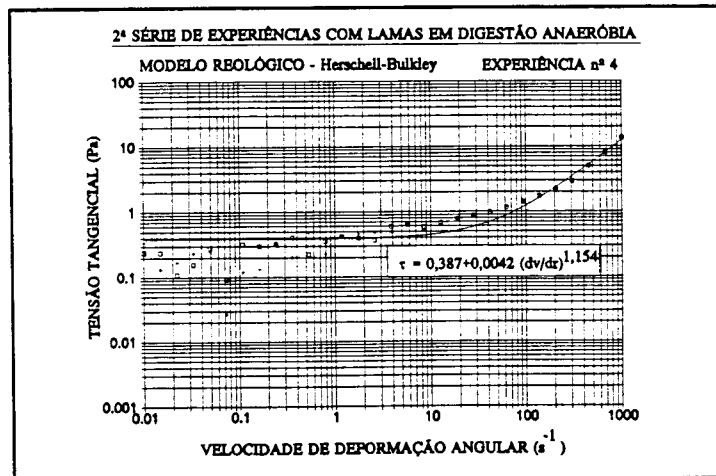


figura B.59



figura B.60

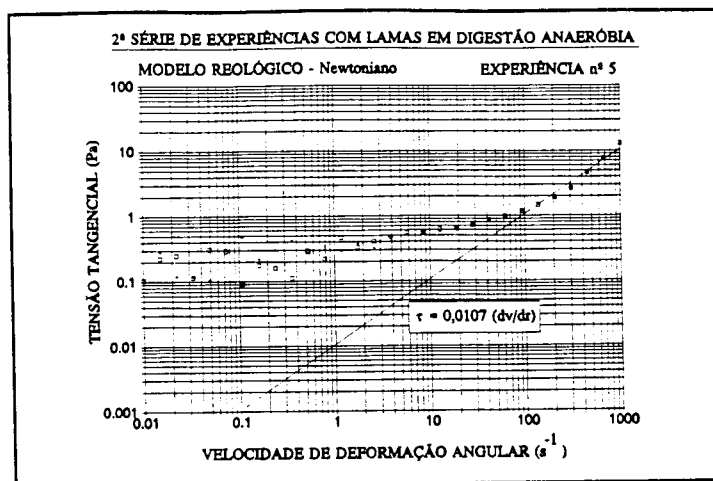


figura B.61

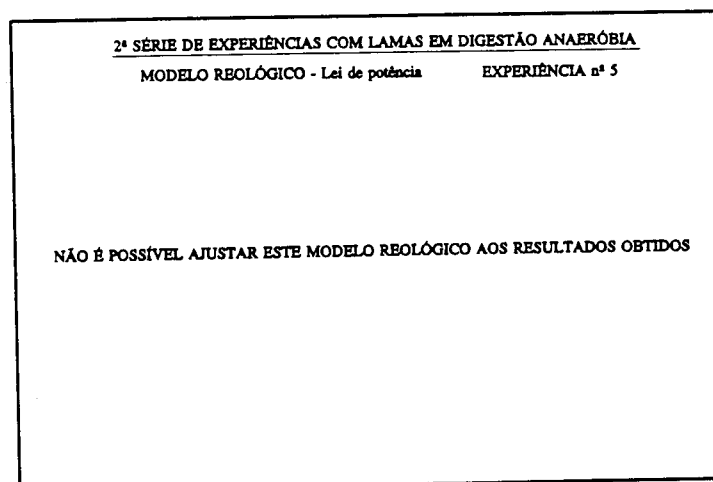


figura B.62



figura B.63

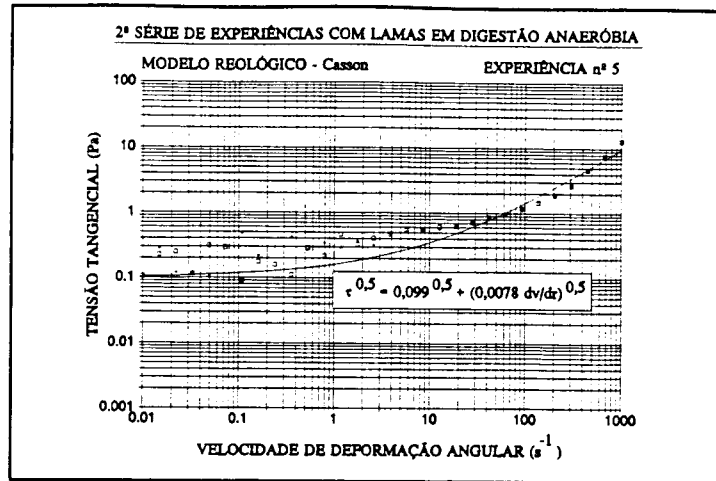


figura B.64

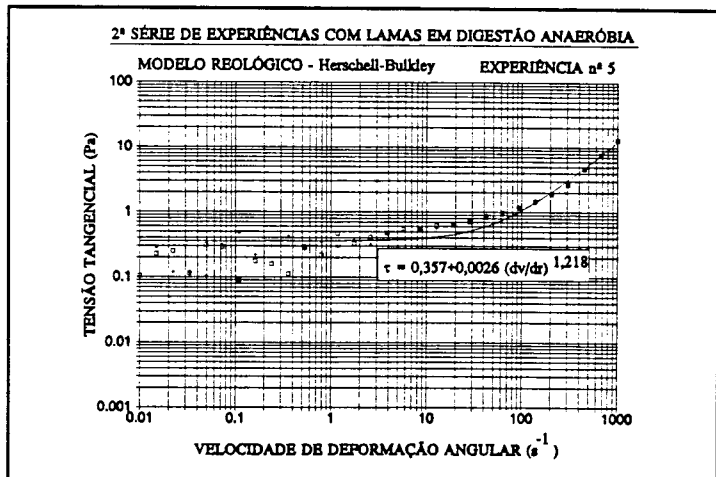


figura B.65

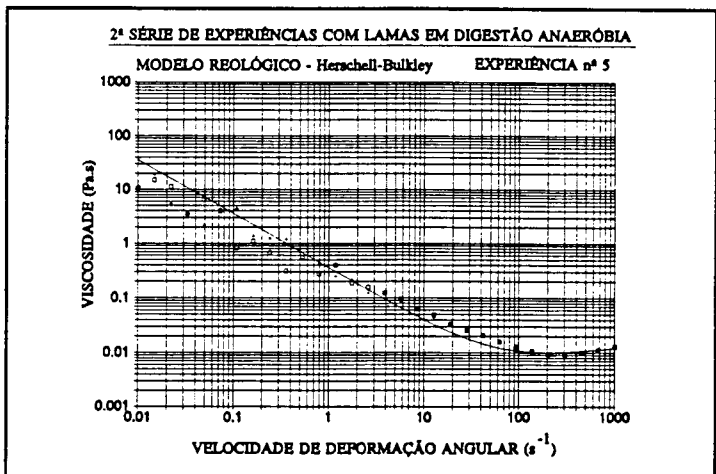


figura B.66



figura B.67

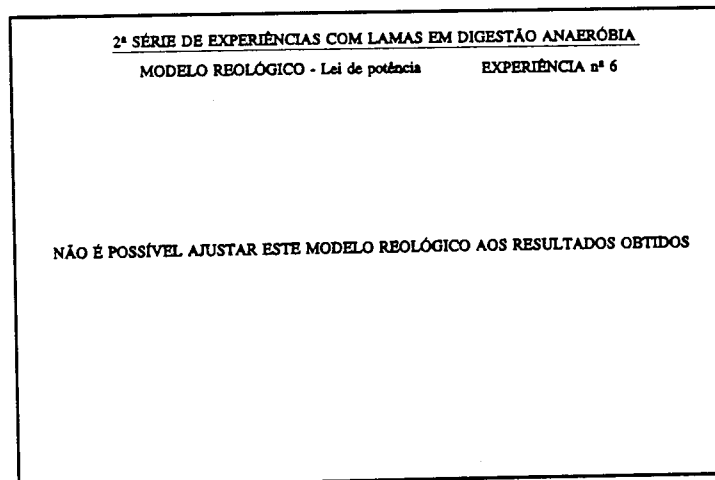


figura B.68



figura B.69

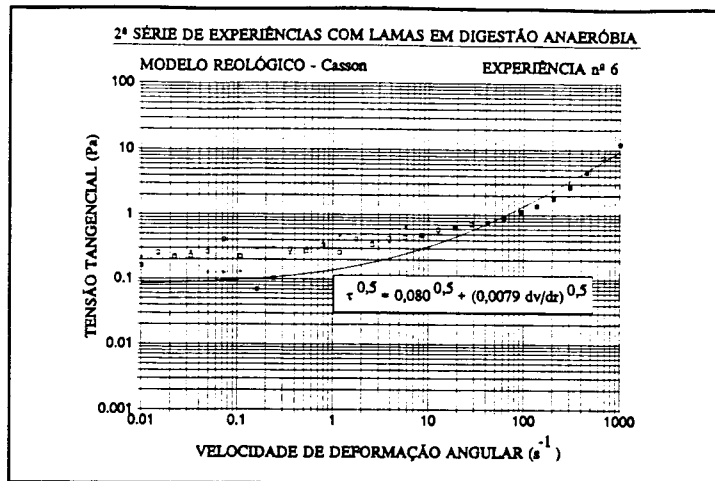


figura B.70

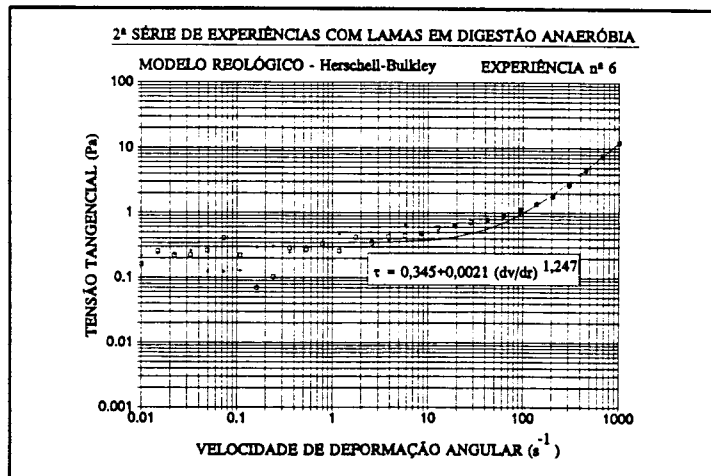


figura B.71

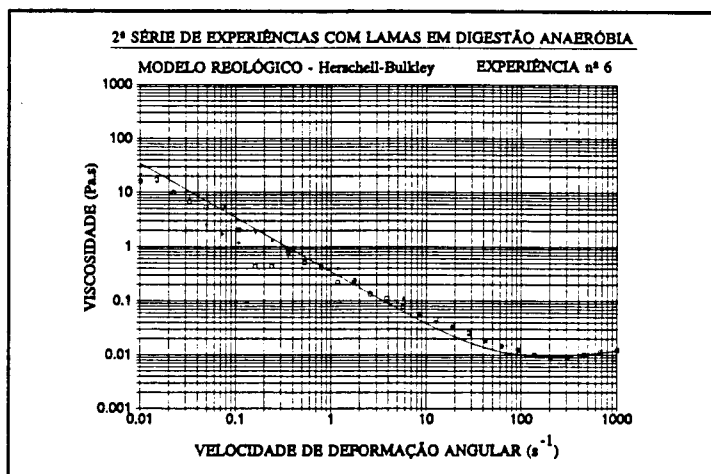


figura B.72

ANEXO C

RESULTADOS OBTIDOS NOS ESTUDOS GRANULOMÉTRICOS

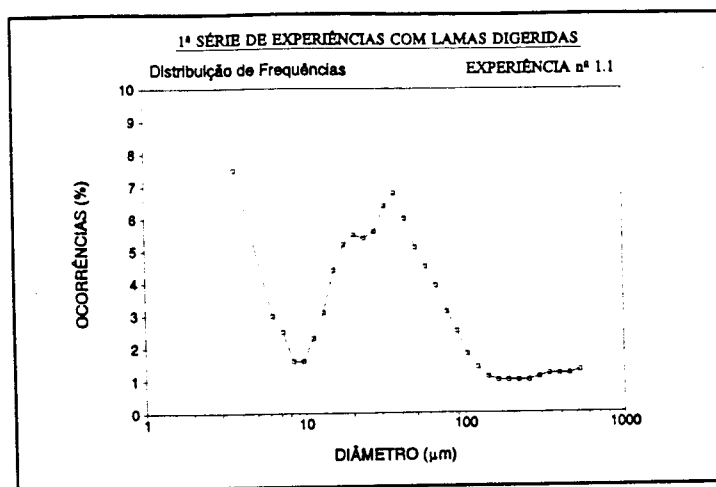


figura C.1

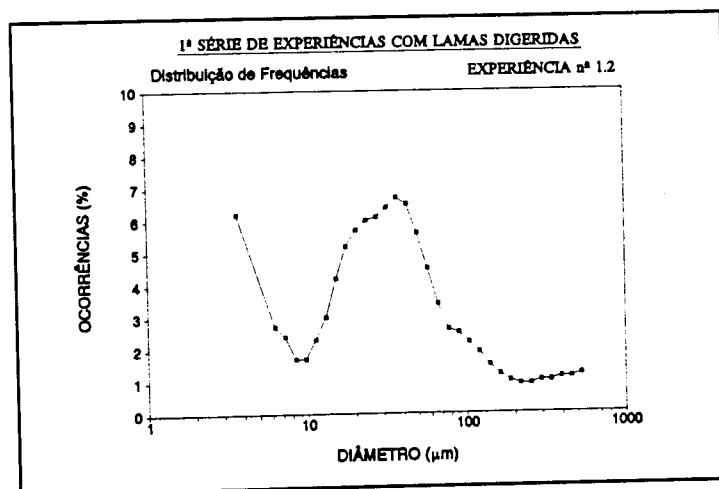


figura C.2

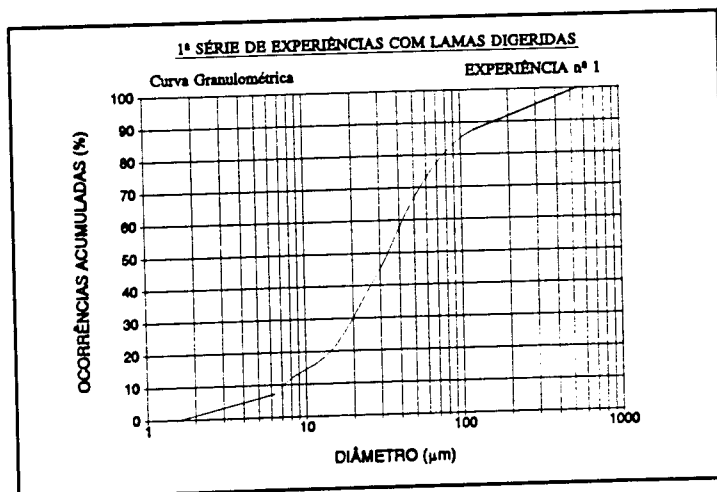


figura C.3

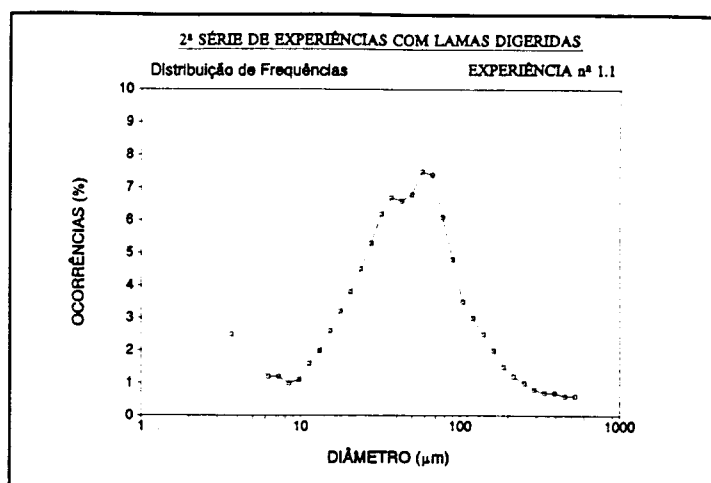


figura C.4

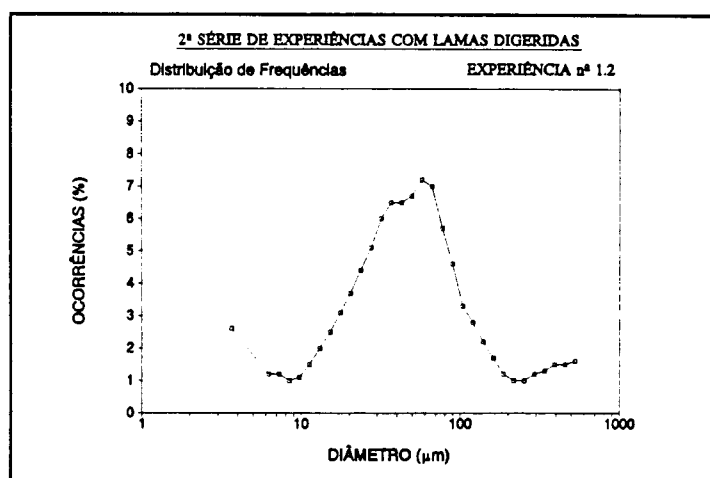


figura C.5

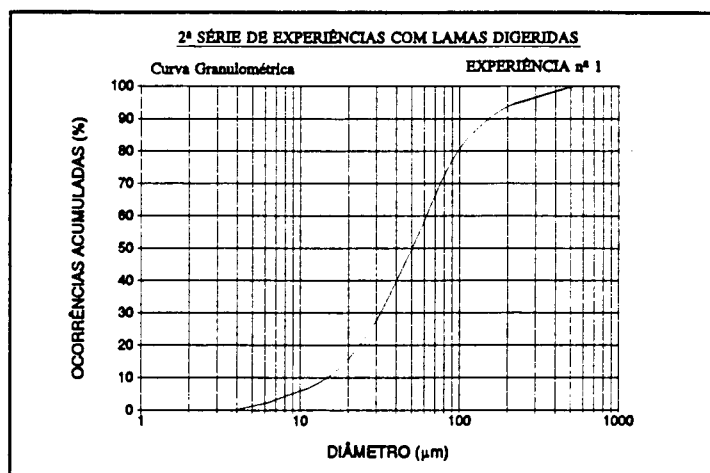


figura C.6

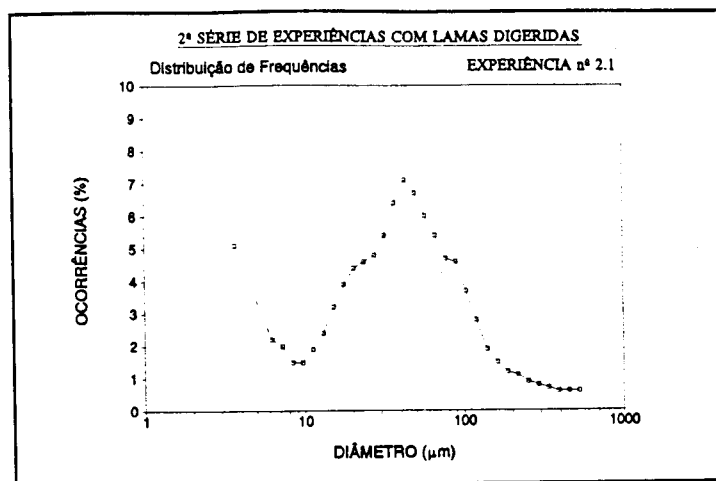


figura C.7

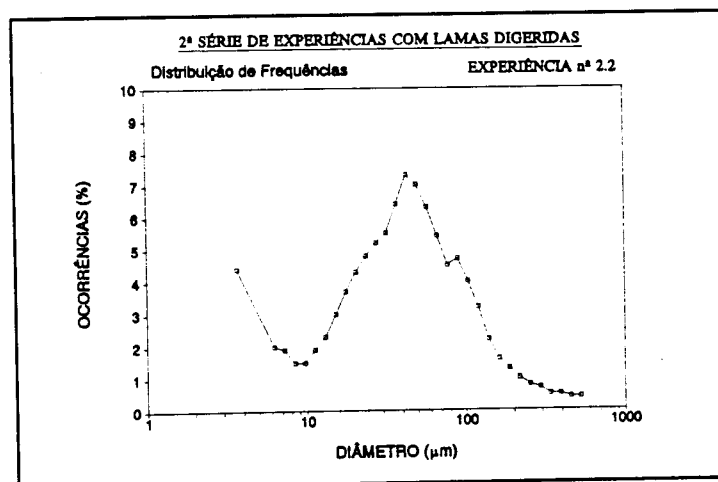


figura C.8

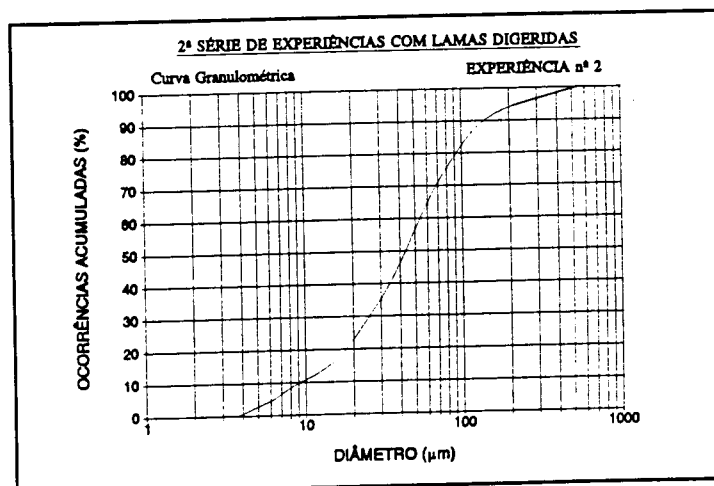


figura C.9

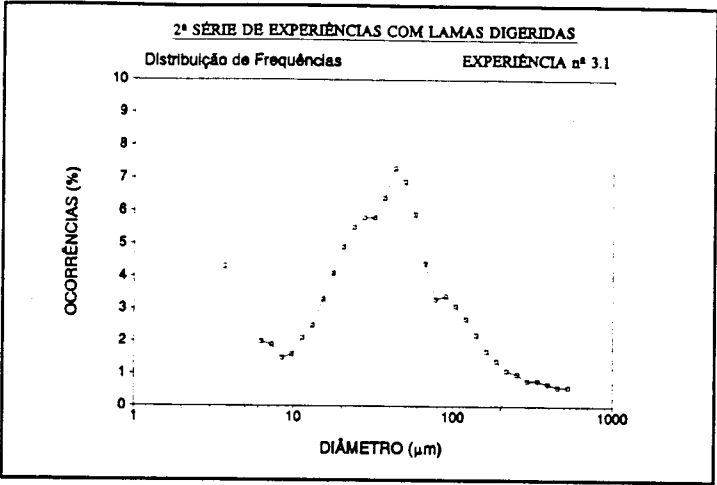


figura C.10

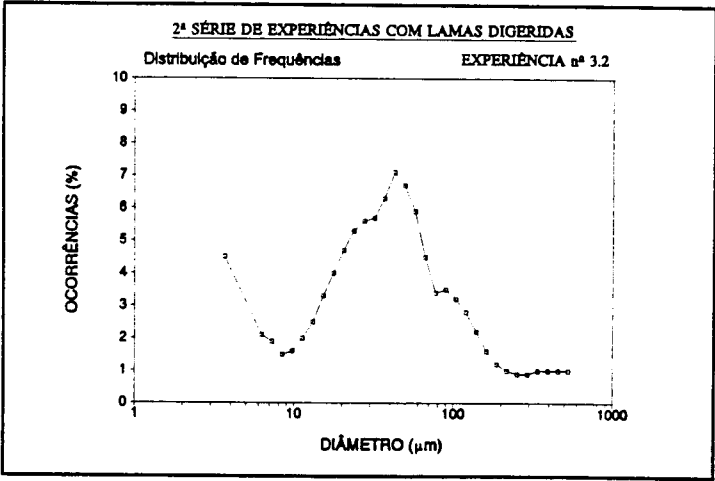


figura C.11

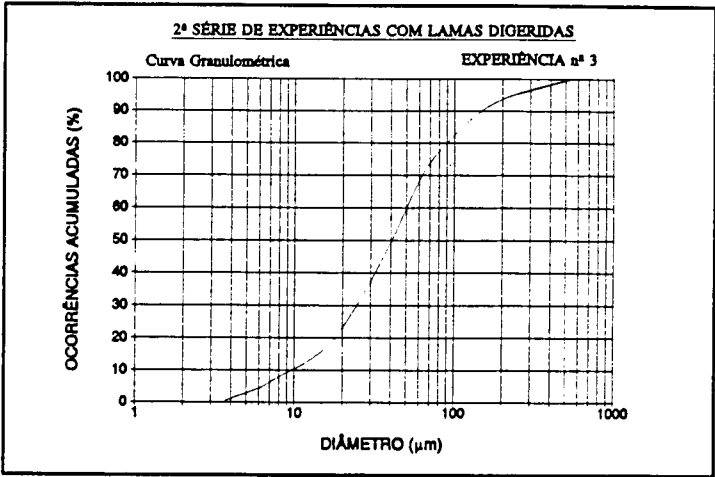


figura C.12

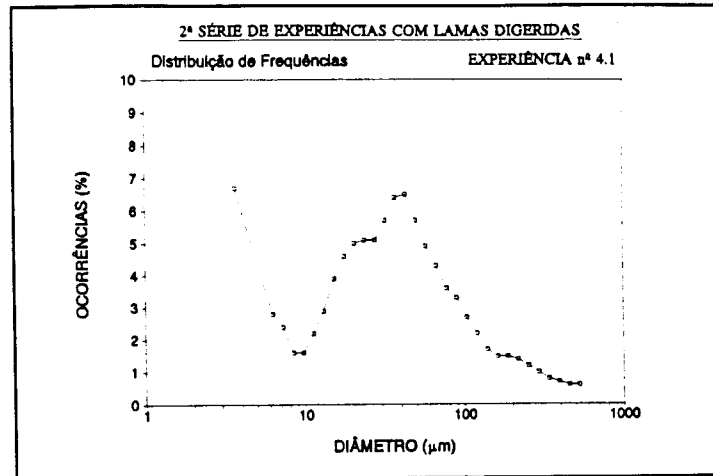


figura C.13

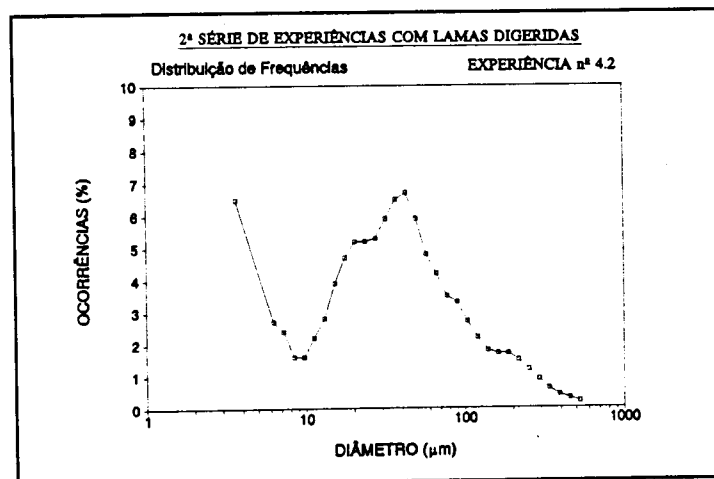


figura C.14

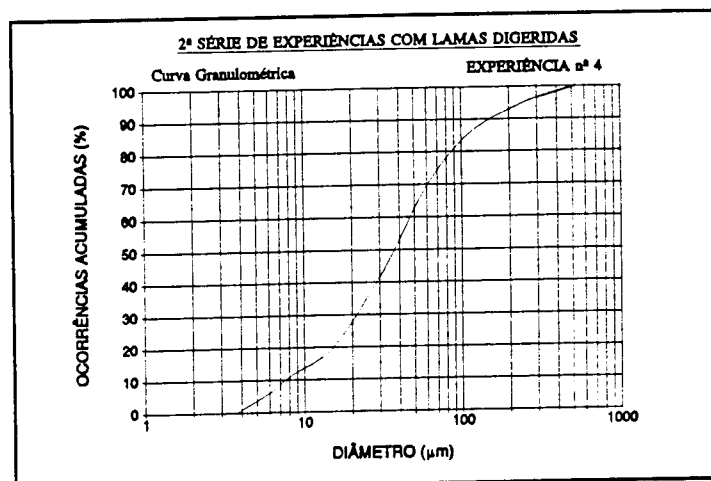


figura C.15

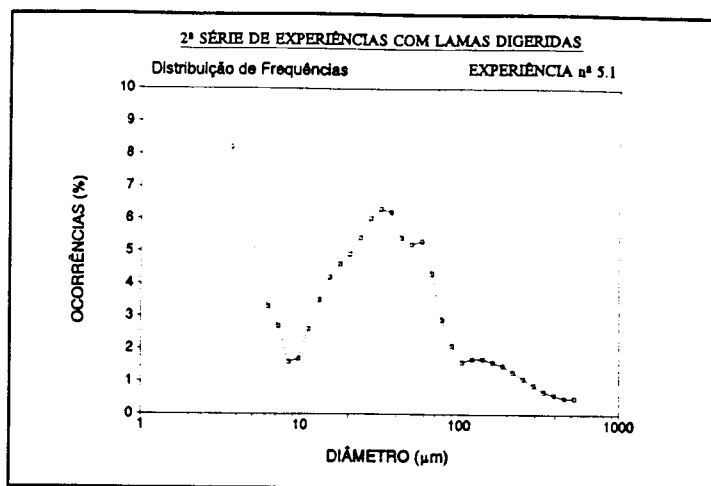


figura C.16

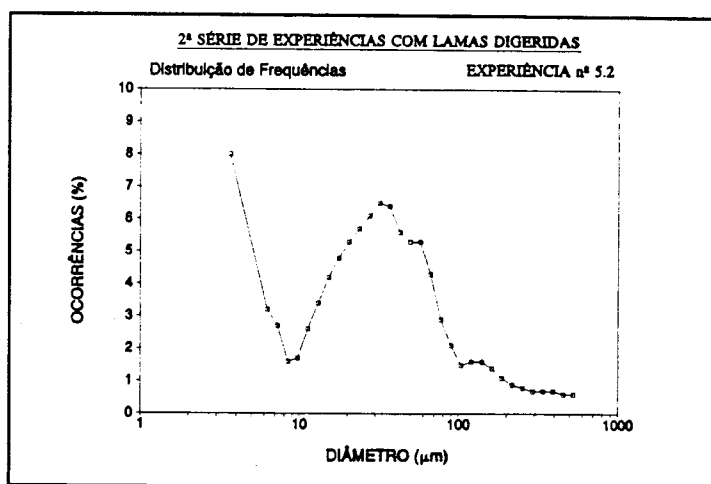


figura C.17

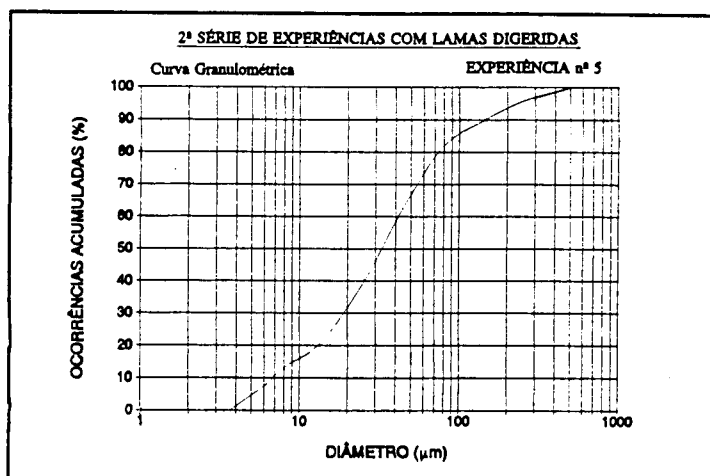


figura C.18

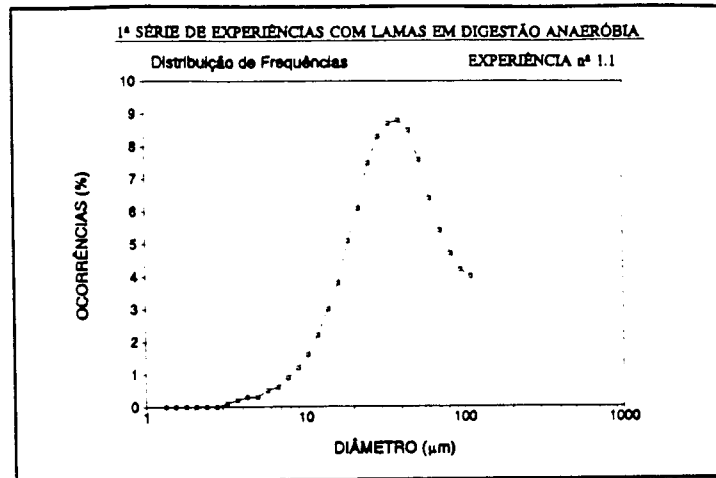


figura C.19

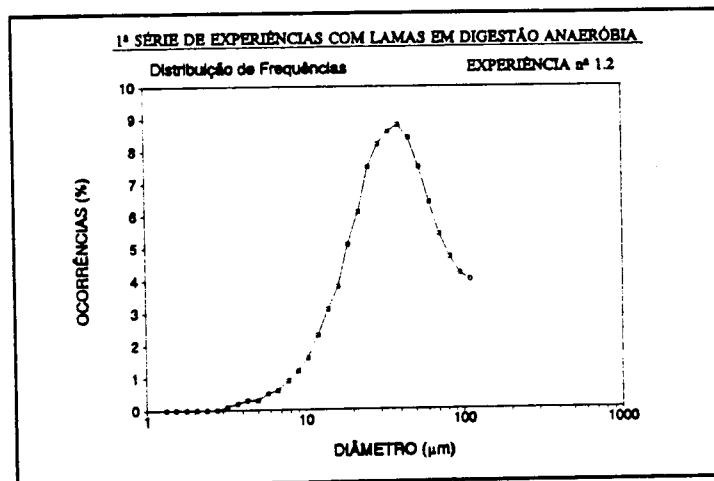


figura C.20

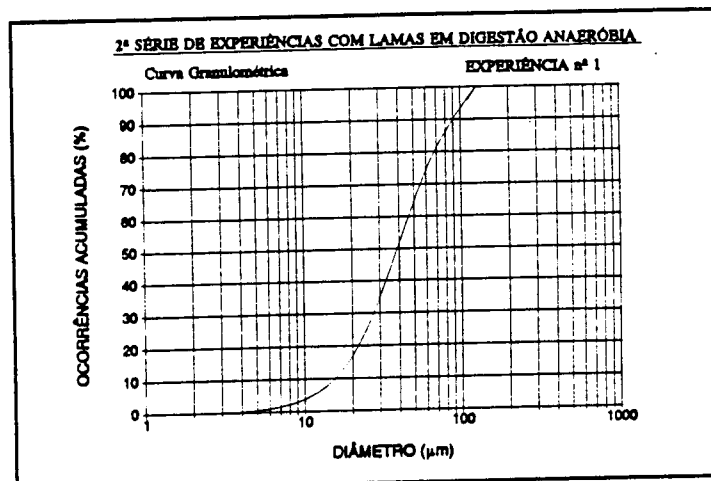


figura C.21

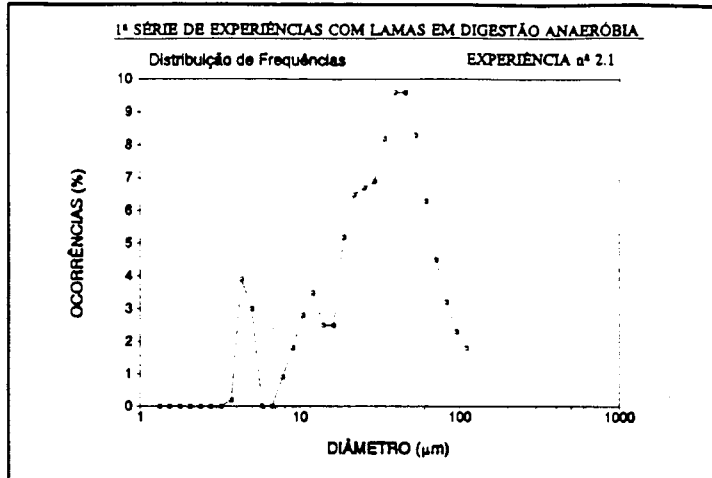


figura C.22

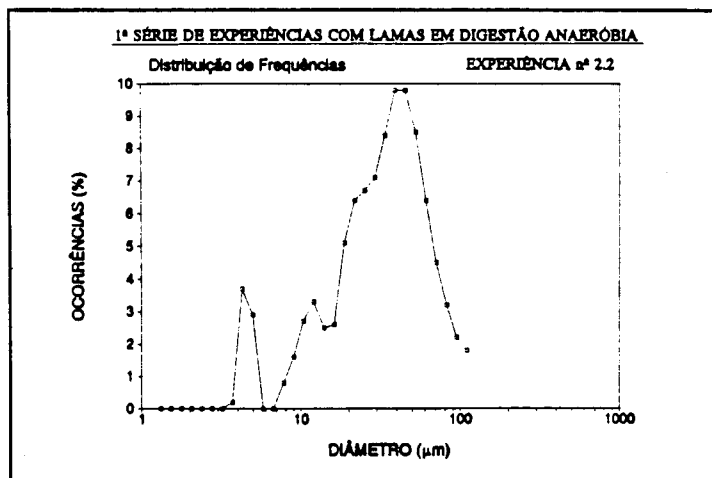


figura C.23

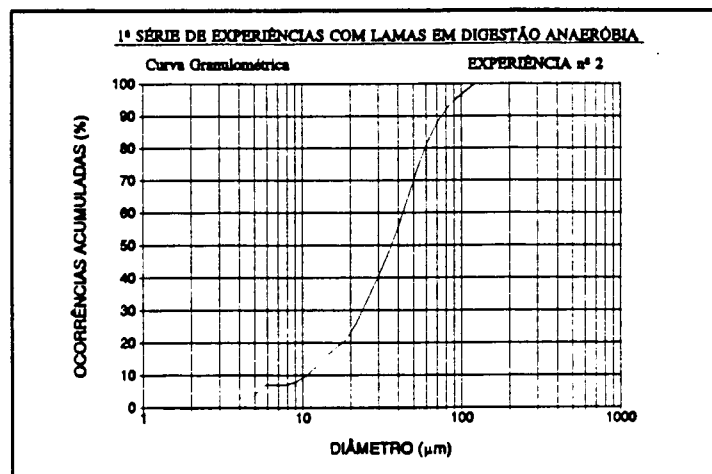


figura C.24

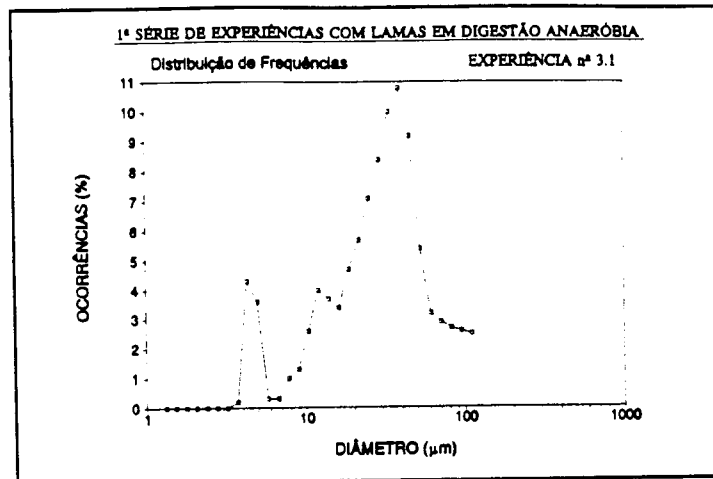


figura C.25

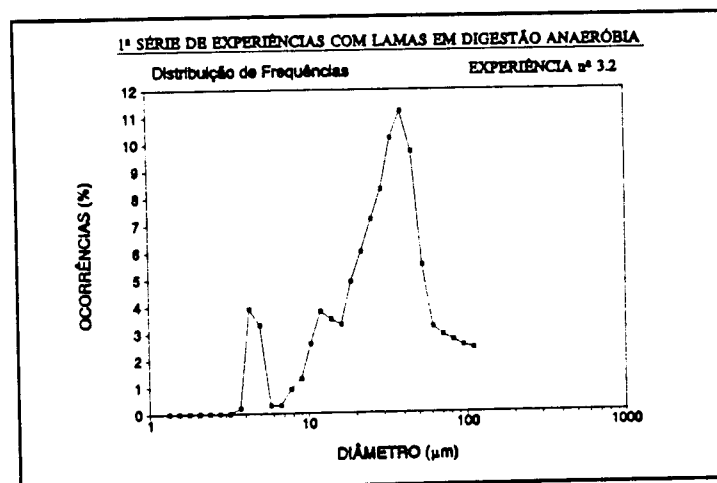


figura C.26

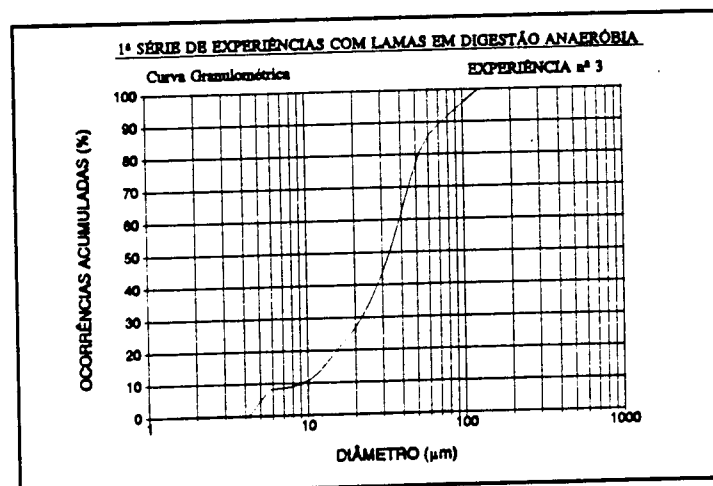


figura C.27

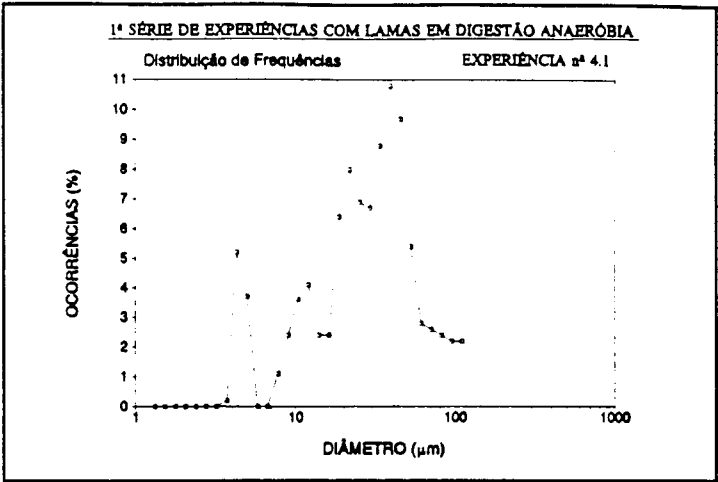


figura C.28

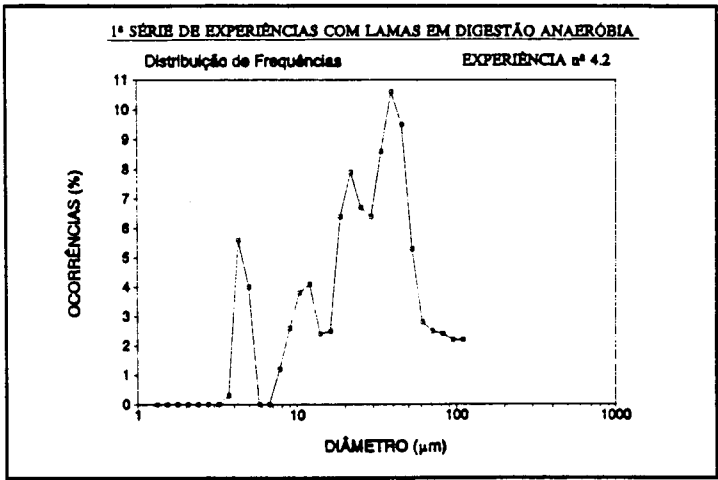


figura C.29

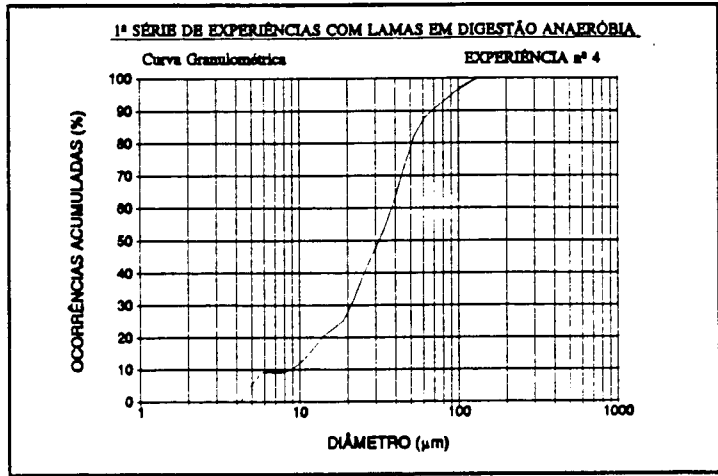


figura C.30

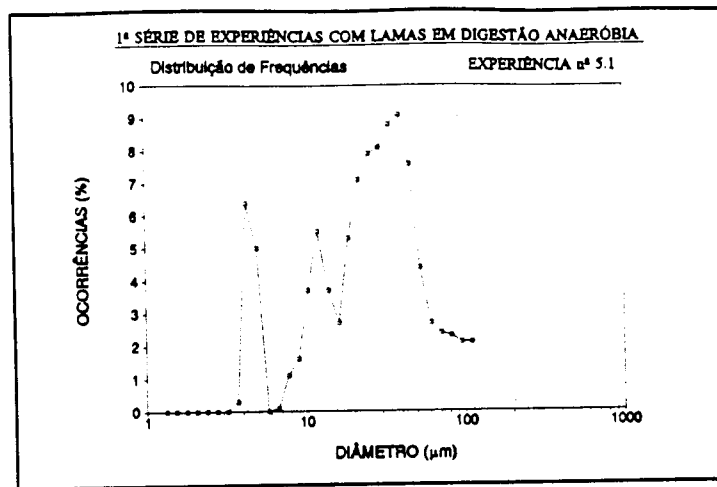


figura C.31

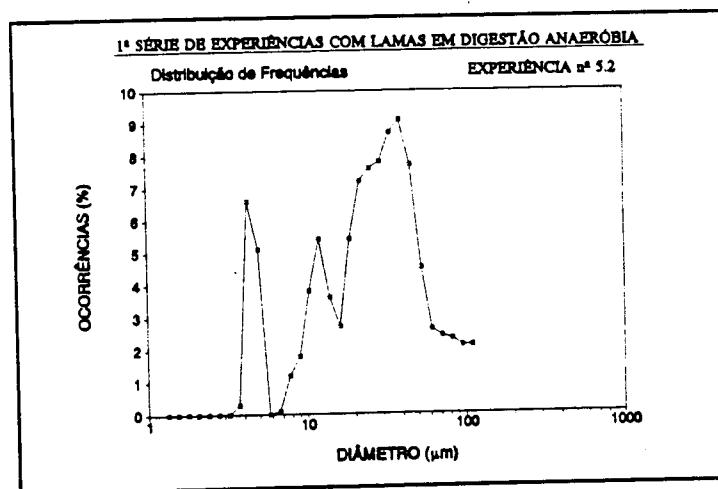


figura C.32

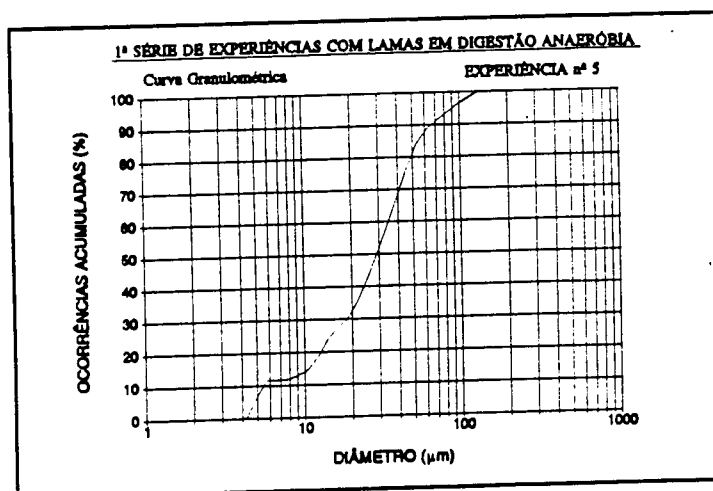


figura C.33

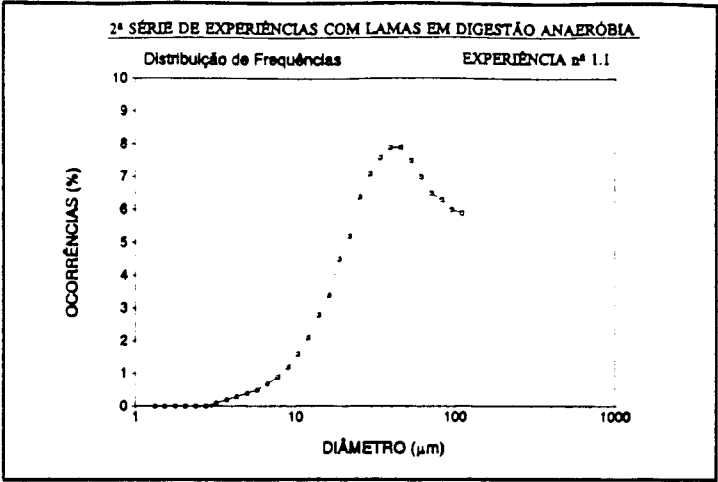


figura C.34

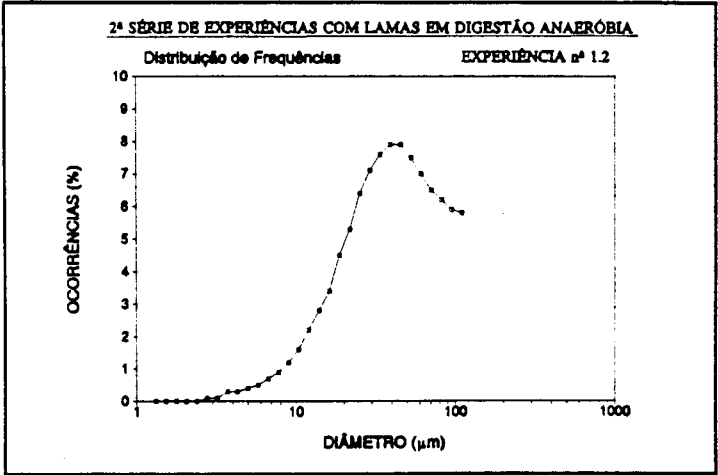


figura C.35

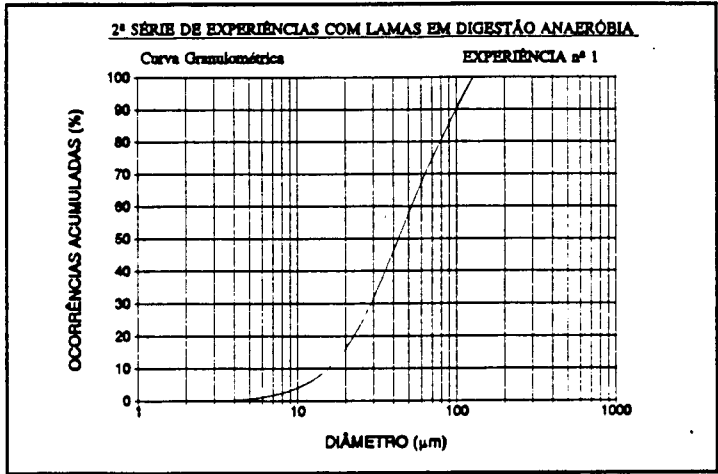


figura C.36

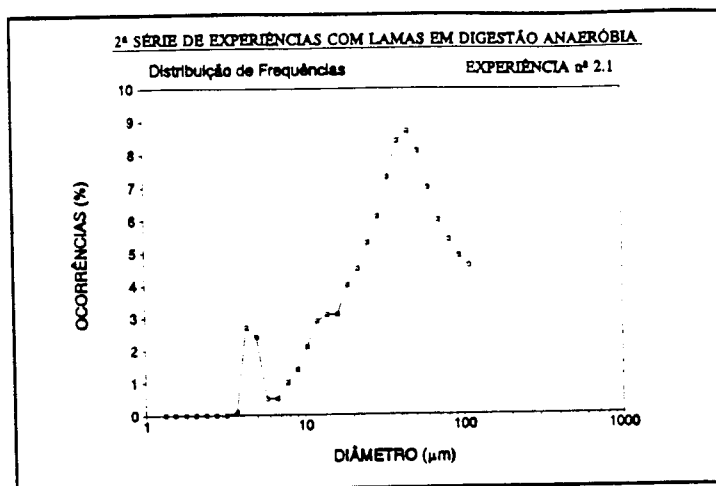


figura C.37

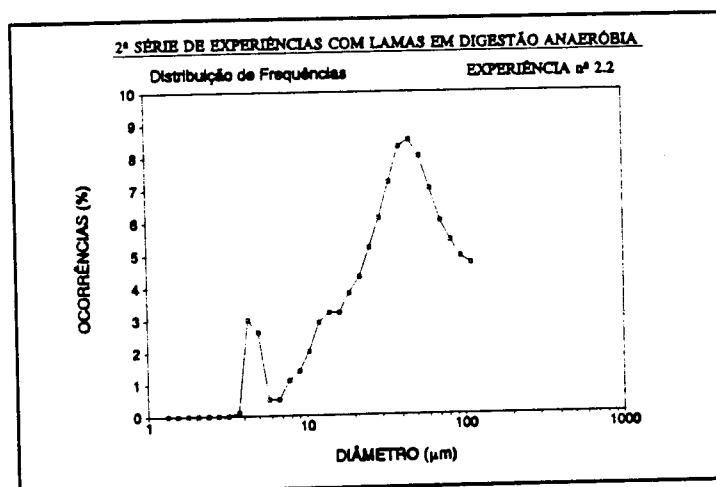


figura C.38

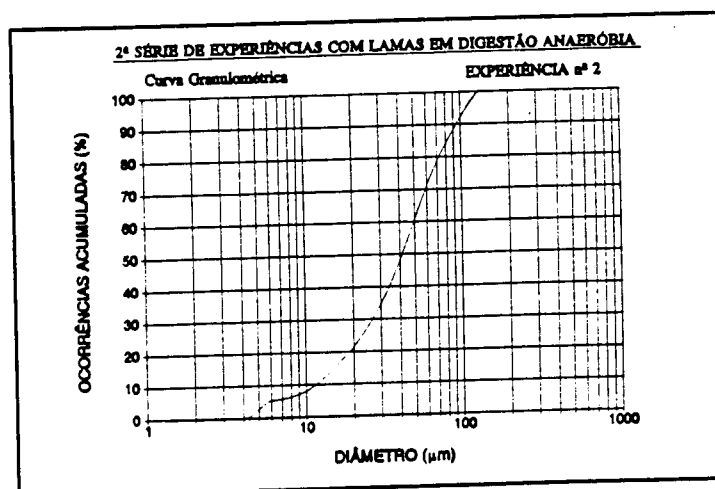


figura C.39

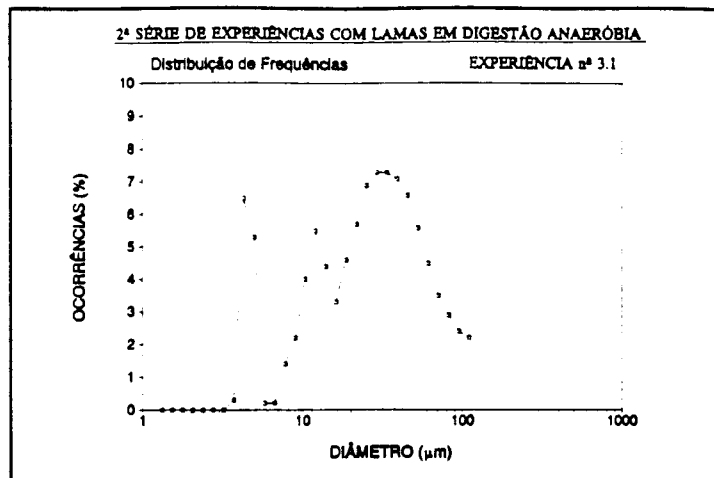


figura C.40

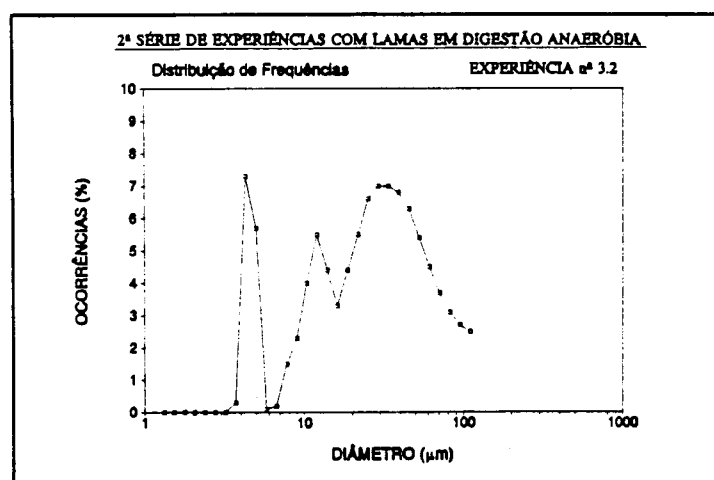


figura C.41

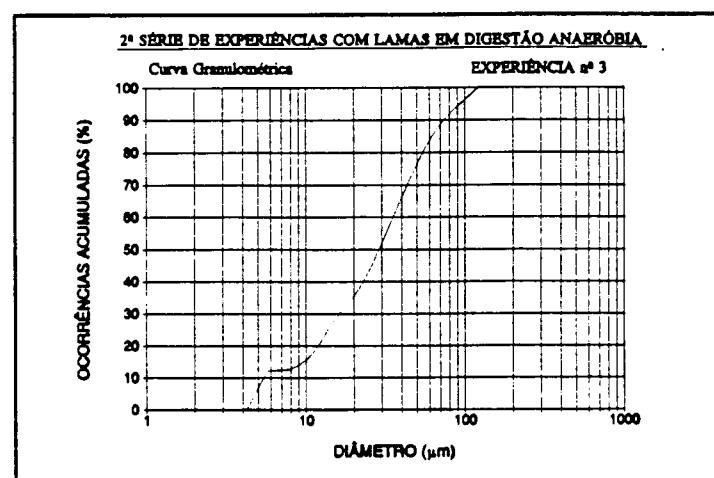


figura C.42

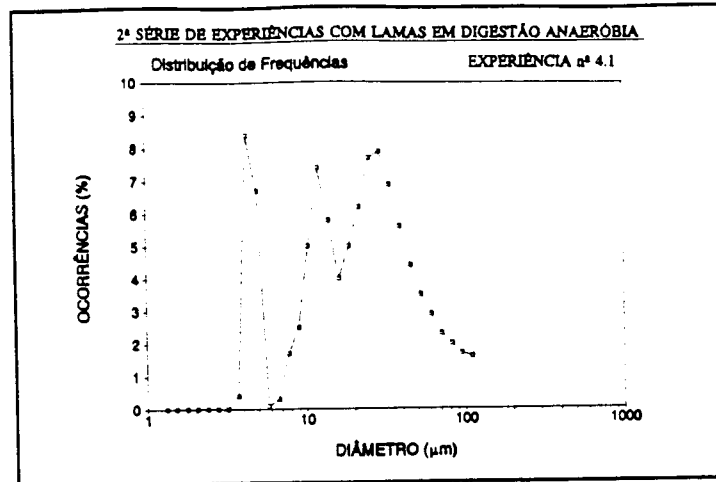


figura C.43

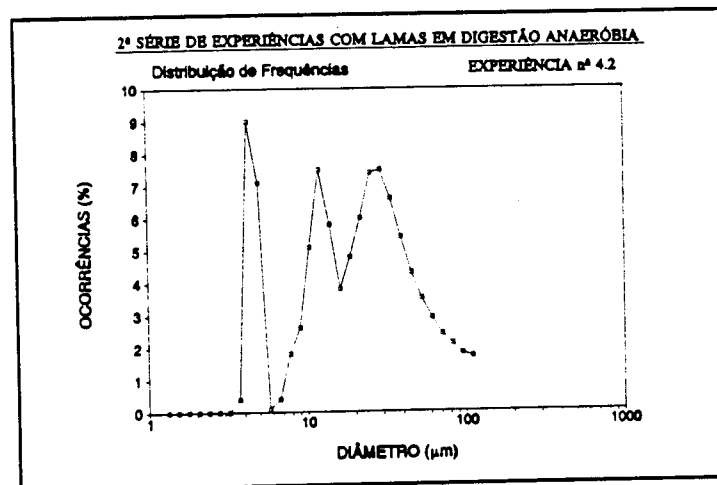


figura C.44

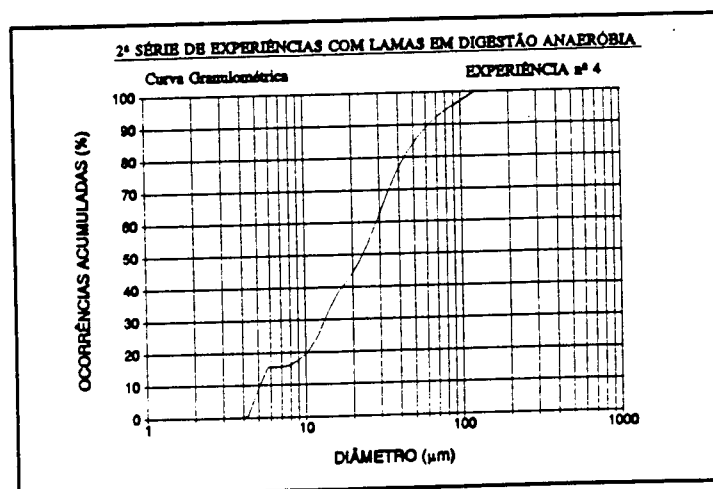


figura C.45

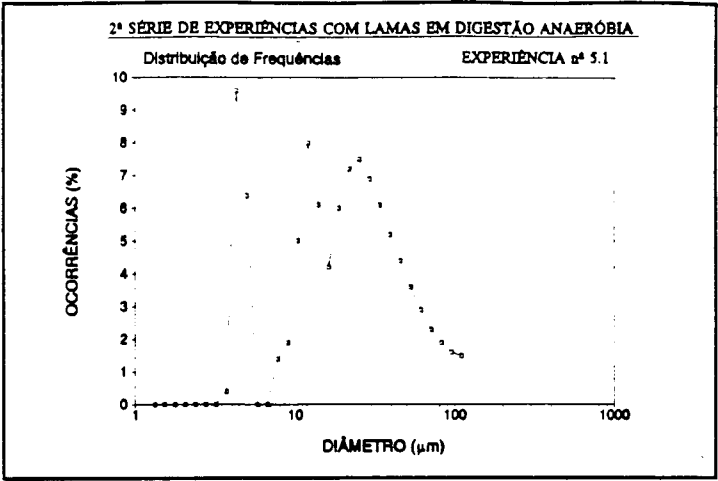


figura C.46

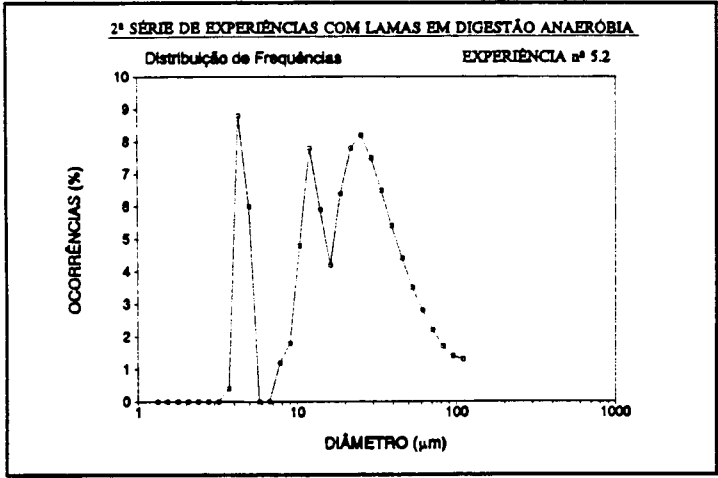


figura C.47

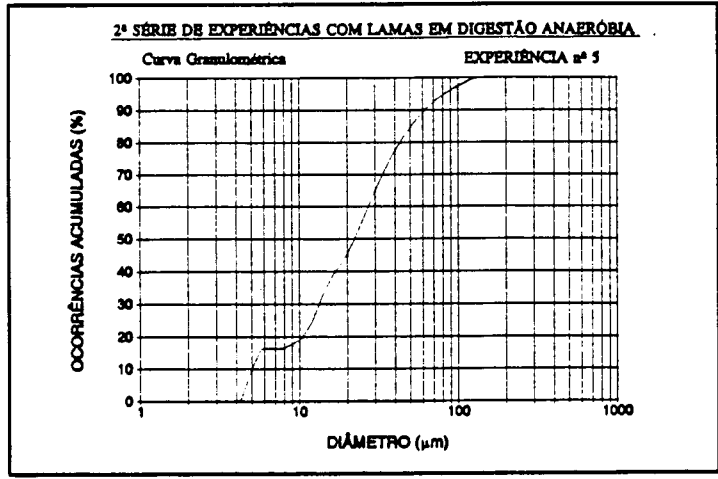


figura C.48

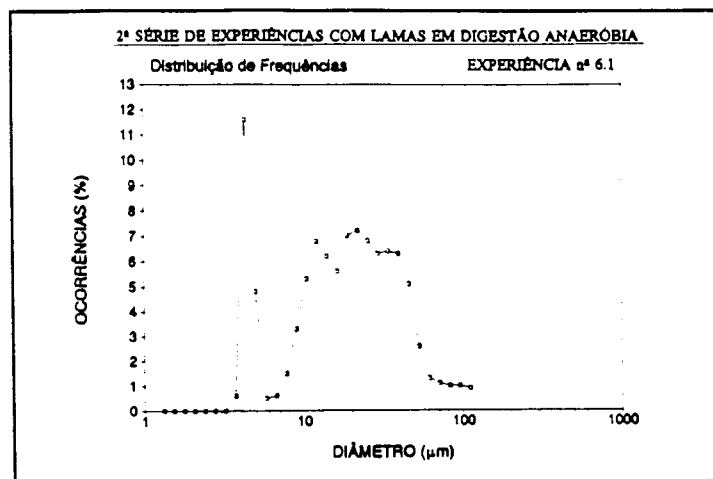


figura C.49

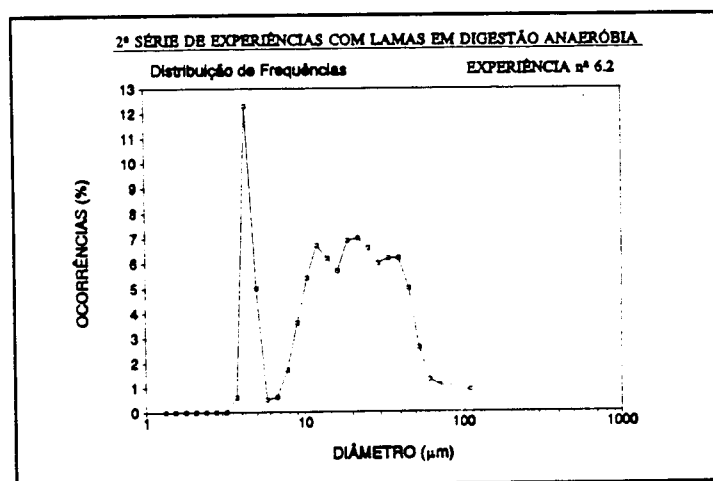


figura C.50

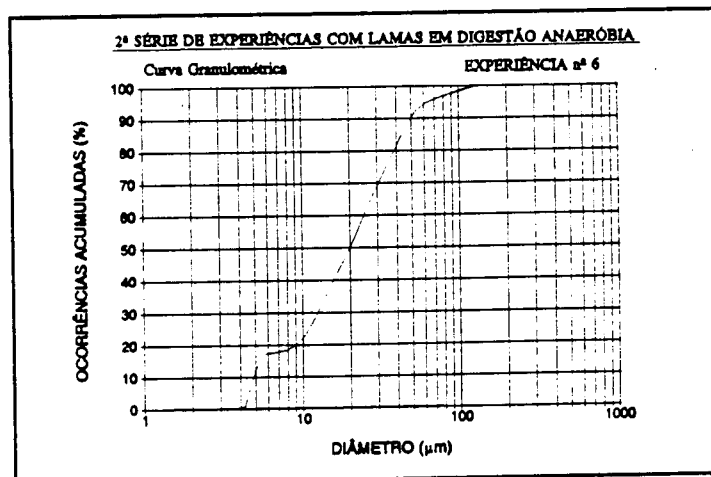


figura C.51



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



000006341