

**ESTUDOS DE TRANSFERÊNCIA DE OXIGÉNIO
EM COLUNAS DE BORBULHAMENTO**

Isabel Maria Brás Pereira



**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO**

1997

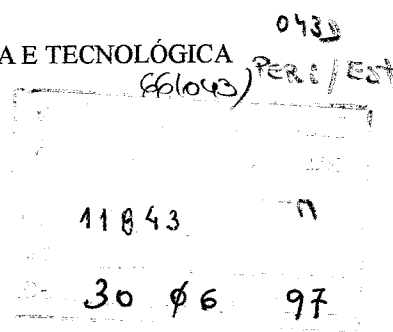
ESTUDOS DE TRANSFERÊNCIA DE OXIGÉNIO EM COLUNAS DE BORBULHAMENTO

Isabel Maria Brás Pereira

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

Publicação subsidiada pela
JUNTA NACIONAL DE INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

1997



AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho teve a colaboração de pessoas e Instituições a quem desejo, aqui, deixar expresso o meu reconhecimento.

Dirijo as primeiras palavras ao supervisor desta tese, Professor João Rui Guedes de Carvalho, a quem devo a ideia original e o acompanhamento científico do trabalho. Porque tudo começou aí, começaria por agradecer ao “Professor” as “lições” claras, simples, e por isso eficazes, de Mecânica de Flúidos e de Fenómenos de Transferência, na sala de aulas e no laboratório. Ao orientador, agradeço as ideias, sugestões e críticas que determinaram a evolução do trabalho. Agradeço ainda a sua disponibilidade e paciência para a leitura da tese, em horas extraordinárias...

As minhas próximas palavras, que gostaria que traduzissem um reconhecimento muito especial, são para o Prof. João Campos. Pelo seu incentivo permanente e pela total disponibilidade. Por todo o tempo que me dispensou para a discussão do trabalho, pelas sugestões e ideias. Porque me ajudou a acreditar... e me “aturou” sempre com a maior paciência (sei que sou responsável, no mínimo, por umas décimas a mais na sua tensão arterial...). Muito Obrigada!

Falo agora convosco, Alexandra, Né, Teresa, queridas companheiras de “jornada” e amigas de todas as horas. Obrigada pelo estímulo e por toda a ajuda. Pelos desabafos que ouviram e pelas crises que aturaram! À Né, obrigada ainda pela leitura comentada...

Agradeço, sensibilizada, aos meus colegas do ISEP e queridos amigos Eng. Francisco Teixeira e Eng. Vitorino Beleza, que acompanharam bem de perto a última etapa deste trabalho e cuja colaboração, sem limites, nunca esquecerei!

Muitas outras pessoas prestaram a sua colaboração neste trabalho, de uma forma mais ou menos directa. À Sabina, agradeço, em particular, a tradução de alguns artigos de alemão para português... Aos outros colegas da equipa de investigação em que este trabalho foi desenvolvido, e aos colegas do Instituto Superior de Engenharia do Porto, que me apoiaram através da sua ajuda e incentivo, expresso toda a minha gratidão.

Ao Prof. Sebastião Feyo de Azevedo e à equipa do Professor José Luís Figueiredo que me facultaram a utilização de alguns meios, e ao Doutor Rui Boaventura, que me forneceu elementos de trabalho, na fase inicial, deixo uma palavra especial de reconhecimento.

Devo agradecer ao Sr. António Rijo a perfeição e prontidão com que muitas das peças, utilizadas nas instalações experimentais, foram executadas na sua oficina.

Agradeço também à Reguladora de Famalicão, a execução graciosa de orifícios circulares em placas metálicas utilizadas nos ensaios experimentais. À Ciba-Geigy, na pessoa do Eng. Sotto Mayor, agradeço o fornecimento de uma amostra de agente anti-espuma, usado nas experiências.

Expresso o meu reconhecimento à Junta Nacional de Investigação Científica pela concessão da bolsa para doutoramento e pelo apoio financeiro para a concretização deste trabalho.

Agradeço à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto o acolhimento como estudante de doutoramento e a disponibilização de meios no Departamento de Engenharia Química, para a realização do trabalho experimental.

Quero também expressar o meu reconhecimento ao Instituto Superior de Engenharia do Instituto Politécnico do Porto, que me facilitou a conclusão da tese, pela concessão de dispensa parcial do serviço docente, na fase final do trabalho.

Uma última palavra, a todos os Amigos (alguns já apareceram lá atrás...) e Familiares, aos que estão mais perto e aos que, apesar de longe, continuam sempre presentes: sem vós, não teria sido possível chegar até aqui. Obrigada pelo apoio constante, pela paciência, pelas férias que não houve, pelos fins-de-semana sempre iguais...

SUMÁRIO

Neste trabalho, apresenta-se um estudo sobre a transferência de oxigénio (do ar para a água) em colunas de borbulhamento pouco profundas, em que a injeção de gás é feita através de um orifício central.

O estudo foi iniciado com a determinação experimental de coeficientes de transferência de massa entre gás e líquido, tendo como referência um modelo teórico que considera a existência de quatro zonas distintas na coluna de borbulhamento: *formação* das bolhas, *subida* das bolhas ao longo do líquido, bolhas *retidas* junto à superfície livre, antes de rebentarem, e a própria *superfície livre*. Analisou-se o efeito do caudal de borbulhamento, da altura de líquido na coluna e do diâmetro do orifício de injeção do gás.

Os valores obtidos experimentalmente para os coeficientes de transferência associados à *formação* das bolhas foram sistematicamente muito superiores aos valores previstos pelas teorias conhecidas, tendo-se concluído que o modelo adoptado não descreve adequadamente o processo global de transferência de massa numa coluna de borbulhamento.

Foi então formulada a hipótese de que o acréscimo de transferência de massa observado pode ser explicado pela dissolução completa de *microbolhas* de ar ($d \leq 100 \mu\text{m}$), invisíveis à vista desarmada, continuamente geradas por “atomização” de uma pequena fracção da corrente gasosa no interior do líquido.

Com vista a verificar esta hipótese foi executado um programa experimental com dois objectivos em mente: (i) evidenciar a existência de microbolhas no líquido e (ii) demonstrar experimentalmente que essas microbolhas contribuem de forma significativa para a absorção. Relativamente ao ponto (i), foram realizados ensaios em que, por aplicação de vácuo, se provocou a expansão das microbolhas, tornando-as visíveis. Relativamente a (ii), a determinação (alternada) de coeficientes de transferência de oxigénio do ar para a água (*absorção*) e da água para azoto (*desabsorção*) permitiu evidenciar a relevância da dissolução das microbolhas para a taxa global de absorção de oxigénio.

O estudo experimental foi complementado por uma análise teórica detalhada da evolução de microbolhas de gás imersas em líquidos, tendo-se desenvolvido um algoritmo para simulação do processo.

Os resultados da aplicação do algoritmo desenvolvido na previsão da evolução de microbolhas de ar e de azoto, em condições idênticas às observadas nos ensaios de transferência de massa realizados, corroboram a ideia de que uma parcela significativa da transferência de oxigénio, do ar para a água, é atribuível à dissolução de microbolhas de ar, formadas em condições de borbulhamento intenso.

Outra conclusão importante deste trabalho é que a injeção de gás a um dado caudal, através de orifícios de diferentes diâmetros, dá origem a maiores áreas interfaciais (e consequentemente a taxas de transferência mais elevadas) por unidade de altura de líquido e a taxas de transferência associadas à *formação* das bolhas significativamente superiores, para os orifícios de menor diâmetro.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA	
2.1	Modelo teórico	6
2.2	Método experimental	
2.2.1	Base do método	10
2.2.2	Descrição dos vários tipos de experiências	12
2.2.3	Instalação experimental	14
2.2.4	Descrição detalhada das principais peças de equipamento	16
2.2.5	Medição e regulação dos diferentes parâmetros	19
2.2.6	Gamas de valores utilizadas para os parâmetros experimentais	22
2.2.7	Sistemas gás-líquido utilizados	23
2.3	Determinação de coeficientes de transferência de massa a partir dos resultados experimentais	
2.3.1	Coefficiente global de transferência de massa	23
2.3.2	Coefficiente de transferência de massa relativo à superfície livre do líquido	25
2.3.3	Coefficiente de transferência de massa relativo à subida das bolhas no líquido	26
2.3.4	Coefficientes de transferência de massa relativos à formação das bolhas e retenção junto à superfície livre	27
2.4	Resultados	
2.4.1	Resultados experimentais	36
2.4.2	Coefficientes de transferência de oxigénio do ar para a água	36
2.5	Comparação dos coeficientes de transferência de massa determinados experimentalmente com valores previstos	

2.5.1	Considerações gerais	46
2.5.2	Coeficiente de transferência de massa relativo à subida das bolhas	47
2.5.3	Coeficiente de transferência de massa relativo à formação das bolhas	53
2.5.4	Resultados das várias correlações. Comparação com os valores obtidos experimentalmente	57
2.6	Insuficiência do modelo de transferência de massa adoptado. Evidências para um modelo complementar	63
3	AS MICROBOLHAS EM PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA POR BORBULHAMENTO: EVIDÊNCIA EXPERIMENTAL E ALGUNS ASPECTOS TEÓRICOS	
3.1	Organização do capítulo	64
3.2	Introdução ao problema	65
3.3	Comprovação da existência de microbolhas em água, em condições de borbulhamento intenso	66
3.4	Análise da evolução de uma microbolha de gás imersa num líquido	
3.4.1	O processo de difusão do soluto	70
3.4.2	Dissolução de uma microbolha de gás, puro, em água previamente saturada	72
3.4.3	Dissolução de uma microbolha de gás, com dois componentes, em água previamente saturada	76
3.4.4	Expansão de uma microbolha, por diminuição da pressão	83
3.5	Referências feitas por outros autores à existência de microbolhas em vários sistemas gás-líquido	87
3.6	Formação das microbolhas	88
4	CONTRIBUIÇÃO DAS MICROBOLHAS PARA A TRANSFERÊNCIA DE MASSA NOS PROCESSOS DE BORBULHAMENTO EM ESTUDO	
4.1	Organização do capítulo	91
4.2	Análise qualitativa da evolução de microbolhas de ar e de azoto imersas em água com oxigénio e azoto dissolvidos	

4.2.1	Introdução	92
4.2.2	Dissolução de uma microbolha de ar, em água com oxigénio e azoto dissolvidos	93
4.2.3	Dissolução de uma microbolha de azoto, em água com oxigénio e azoto dissolvidos	99
4.3	Comparação dos processos de absorção e desabsorção, por via experimental	
4.3.1	Ensaio de desabsorção realizados nas condições dos ensaios tipo A	100
4.3.2	Comparação de absorção e desabsorção a baixos caudais de borbulhamento	102
4.4	Análise quantitativa da dissolução ou crescimento de microbolhas em água	
4.4.1	Aspectos gerais	105
4.4.2	Microbolhas de gás puro	106
4.4.3	Microbolhas de gás com vários componentes	109
4.5	Aplicação do algoritmo desenvolvido a sistemas usados por outros autores e comparação dos resultados	112
4.6	Aplicação do algoritmo desenvolvido na previsão da evolução de microbolhas nas condições dos ensaios tipo A (absorção de O_2) e tipo C (desabsorção de O_2)	
4.6.1	Introdução	116
4.6.2	Resultados da simulação	118
4.7	Considerações finais	142

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1	Resultados experimentais. Nota introdutória	144
5.2	Coeficientes globais de transferência de massa	
5.2.1	Absorção de oxigénio	145
5.2.2	Desabsorção de oxigénio	145
5.3	Coeficientes individuais de transferência de massa	
5.3.1	Reformulação do modelo teórico de transferência de massa, na coluna de borbulhamento	150

5.3.2	Coeficiente de transferência de massa relativo à superfície livre do líquido	152
5.3.3	Coeficientes de transferência de massa relativos à formação, subida e bolhas retidas junto à superfície livre do líquido	158
5.4	Quantificação da taxa de transferência de oxigénio através das microbolhas	188
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO	192
APÊNDICES		
A.1	Comparação das resistências do lado do líquido e do lado do gás, na transferência de gases pouco solúveis no líquido	196
A.2	Análise da variação da pressão parcial de oxigénio numa bolha de ar, ou de azoto, ao atravessar uma coluna de água	199
A.3	Determinação do tamanho de uma bolha de gás, formada num orifício, a caudal constante	204
A.4	Determinação do coeficiente global de transferência de oxigénio, numa coluna de borbulhamento, em estado transitório	210
A.5	Estimativa dos valores da concentração de azoto dissolvido na coluna de borbulhamento	212
B.1	Resultados experimentais	216
C.1	Definição de área superficial, volume e diâmetro equivalente de bolhas elipsoidais e calotes esféricas	237
C.2	Propriedades físico-químicas	239
NOMENCLATURA		240
REFERÊNCIAS		247
ÍNDICE DE FIGURAS		255

1 INTRODUÇÃO

A transferência de massa entre uma fase gasosa e uma fase líquida, em colunas e tanques de borbulhamento, tem sido objecto de muitos e variados estudos, dada a incontestável importância daquelas unidades nas indústrias química, farmacêutica, mineira e bioquímica, como unidades de separação e/ou reactores químicos.

O contacto, e consequente transferência de solutos entre as duas fases, gás e líquido, destina-se frequentemente a remover componentes, indesejáveis ou não, do gás para o líquido (absorção), onde podem vir a ser consumidos por reacção química. Em muitas outras situações práticas, o objectivo do contacto gás-líquido é mesmo o transporte de reagentes para a fase em que se pretende promover uma determinada reacção.

Numa coluna ou tanque de borbulhamento, o gás é disperso na fase líquida sob a forma de bolhas, com uma vantagem imediata que é a criação de grandes áreas interfaciais por unidade de volume de líquido. A admissão do gás é normalmente feita na base da coluna (ou tanque), permitindo a sua subida através do líquido. Existe uma grande variedade de distribuidores de gás, por exemplo, difusores cerâmicos, metálicos ou de vidro, placas perfuradas com orifícios de diâmetro conhecido, ou tubos borbulhadores.

O seu baixo custo, versatilidade e facilidade de operação tornaram a coluna (e tanque) de borbulhamento como uma das unidades de contacto gás-líquido mais utilizadas.

Além de permitir a transferência de componentes entre as duas fases, o borbulhamento do gás é muitas vezes suficiente (em colunas pouco profundas) para impor uma boa agitação do líquido, permitindo uniformidade de composição e temperatura.

Refira-se, pela sua actualidade, a utilização deste processo no tratamento biológico de águas residuais. O arejamento, numa estação de tratamento por lamas activadas, que se destina a fornecer o oxigénio necessário à degradação biológica (aeróbia) de matéria orgânica, constitui, por exemplo, a maior parcela nos gastos totais de energia, podendo

representar 60 a 80% desses custos (Hwang e Stenstrom, 1985). É de todo o interesse, portanto, tentar rentabilizar a transferência de oxigénio, neste tipo de unidades.

O projecto de uma unidade de borbulhamento envolve, prioritariamente, o conhecimento de coeficientes de transferência de massa e áreas interfaciais. As propriedades físico-químicas do gás e do líquido, o tipo de difusor, os caudais de gás utilizados e a geometria da unidade são factores condicionantes de coeficientes e áreas de transferência, afectando a eficiência da operação.

Existe, por exemplo, uma tendência crescente para utilizar difusores de gás que promovem a formação de bolhas muito pequenas, gerando, para um mesmo caudal de gás, maiores áreas interfaciais. Determinações de coeficientes de transferência de massa, através de bolhas muito pequenas de oxigénio (Motarjemi e Jameson, 1978), confirmam que bolhas com menos de 1 mm de diâmetro são as mais "eficazes", indicando que grande parte das unidades de arejamento, a operar com bolhas entre 2 e 5 mm de diâmetro, funcionam em condições bastante aquém das óptimas. No entanto, a formação de bolhas de menor tamanho implica, normalmente, maiores quedas de pressão na admissão de gás, já que os orifícios ou tubos borbulhadores terão, necessariamente, menores diâmetros.

Trata-se de um problema de projecto complexo que, na maioria dos casos, exige, paralelamente a uma modelização teórica, um estudo em laboratório e à escala industrial do sistema que se pretende implementar.

Os estudos de transferência de massa em colunas de borbulhamento, que, na generalidade, resultam na apresentação de correlações empíricas de aplicação algo restrita, apontam para a necessidade de um estudo mais aprofundado dos fundamentos do processo, tais como a hidrodinâmica das fases envolvidas e condições nas interfaces (Deckwer e Schumpe, 1987).

Numa coluna de borbulhamento, podem identificar-se diferentes regiões, a que estão associados comportamentos hidrodinâmicos distintos das fases líquida e gasosa,

concentrações variáveis do gás, e às quais correspondem, normalmente, diferentes “capacidades” para a transferência de massa.

A concepção da coluna de borbulhamento “dividida” em três regiões é partilhada por alguns autores, por exemplo Hong e Brauer (1989), que as identificam como sendo: a da formação das bolhas, a de subida das bolhas ao longo do líquido e a de “separação” das duas fases, no topo da coluna de líquido.

Um estudo alargado de vários aspectos fundamentais da caracterização de borbulhadores gás-líquido é apresentado pela equipa de investigação em que esta tese foi desenvolvida (Rocha, 1984, Rocha e Guedes de Carvalho, 1984, Guedes de Carvalho *et al.*, 1986, e Rocha e Guedes de Carvalho, 1987). Nesse estudo, o modelo teórico de transferência de massa no borbulhador pressupõe também a existência de três zonas distintas: a zona de formação das bolhas, a zona de subida das bolhas através do líquido e a superfície livre do líquido. Para cada uma destas zonas, e para vários sistemas (absorção física, absorção com reacção química rápida e absorção com reacção química instantânea), foram determinados coeficientes individuais de transferência de massa e áreas interfaciais.

Os valores determinados experimentalmente (Guedes de Carvalho *et al.*, 1986) do coeficiente de transferência de massa associado à formação das bolhas, em orifícios, mostraram-se muito superiores (até 30 a 35 vezes) aos correspondentes valores teóricos. Estes resultados evidenciaram alguma fraqueza do modelo desenvolvido para a caracterização adequada do borbulhador. Muitos autores (Clift *et al.*, 1978, Alvarez-Cuenca *et al.*, 1980, Yoshida e Akita, 1965, Deckwer *et al.*, 1974, Deckwer *et al.*, 1980, Deckwer *et al.*, 1983, Shulman e Molstad, 1950) são unânimes em afirmar que, à zona de formação das bolhas, está normalmente associada uma taxa acrescida de transferência de massa. Apontam-se, como factores responsáveis por esse acréscimo, os fenómenos de quebra e/ou coalescência entre bolhas consecutivas, na vizinhança do orifício. Esta interacção entre bolhas regista-se quando a formação das bolhas se torna “turbulenta”, o que acontece a partir de um determinado valor do caudal de borbulhamento, para um dado orifício.

Mesmo assim, esta não poderia ser a única explicação a justificar a ocorrência de diferenças tão elevadas entre valores experimentais e valores teóricos do coeficiente de transferência de massa associado à zona de formação (Guedes de Carvalho *et al.*, 1986).

Por observação experimental, Guedes de Carvalho *et al.* (1986) verificaram que um número considerável de bolhas ficava retido junto à superfície livre do líquido, antes de rebentar. Pensou-se, então, que a transferência de massa através destas bolhas, que não tinha sido contabilizada pelo modelo teórico, estava certamente incluída no termo da taxa de transferência associado à formação, dando lugar a valores (experimentais) mais elevados do coeficiente de transferência de massa correspondente.

O trabalho apresentado nesta tese surge da necessidade de confirmar aquela suposição, e, também, do interesse em clarificar, um pouco mais, a importância dos vários mecanismos presentes no processo de transferência de massa, numa coluna de borbulhamento. Pretendeu-se ainda estudar a influência do diâmetro do orifício, com particular relevo para orifícios de pequeno diâmetro, o que não tinha sido feito nos trabalhos precedentes. O sistema seleccionado foi oxigénio-água (absorção física).

O estudo experimental foi planificado de forma a isolar e quantificar as quatro contribuições identificadas para a taxa global de transferência de massa: formação, subida, bolhas retidas junto à superfície livre e superfície livre do líquido.

A realização do trabalho foi “revelando” que existe uma outra contribuição importante para a transferência de oxigénio em água: a de um número considerável de bolhas, muito pequenas, na sua maioria invisíveis à pressão atmosférica, com diâmetros inferiores a 75-100 μm . Estas pequenas bolhas são formadas simultaneamente com as bolhas “principais”, na injeção do gás, ou podem ser resultantes do rebentamento destas à superfície. Independentemente da sua origem, a circulação do líquido impõe-lhes certamente um tempo de residência significativo, durante o qual as “microbolhas” podem perder para o líquido grande parte ou a totalidade do soluto.

Como, na concepção original do trabalho, não se previa a importância das microbolhas no processo de transferência de massa, apresentar-se-á no capítulo seguinte (Capítulo 2) o

modelo teórico inicialmente concebido, apenas a quatro parâmetros (formação, subida, retenção das bolhas junto à superfície e superfície livre do líquido). Descreve-se, também no Capítulo 2, o método experimental adoptado para a determinação dos vários coeficientes de transferência de massa. Em face dos resultados obtidos, e de observações feitas durante os ensaios experimentais, que foram sugerindo a possibilidade de um “novo” contributo, demonstra-se a necessidade de reformular o modelo teórico desenvolvido. Nos Capítulos 3 e 4 faz-se uma análise detalhada do mecanismo de transferência de massa entre microbolhas e líquido, apresentando-se igualmente a comprovação experimental da existência das microbolhas e da sua efectiva contribuição, nas condições do presente trabalho. Com base na análise apresentada no Capítulo 4, os resultados do estudo de transferência de massa em coluna de borbulhamento são apresentados e discutidos, no Capítulo 5, com um relevo especial dado à contribuição das microbolhas, para a taxa global de transferência de massa.

2 DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA

2.1 MODELO TEÓRICO

Pretende-se, neste trabalho, desenvolver um modelo teórico que permita determinar a taxa de transferência de soluto, $\dot{n}$, entre gás e líquido, numa situação como a esquematizada na figura 2.1. A coluna de diâmetro interno D_c contém líquido até uma altura h , no qual borbulha um gás, injectado através de um orifício central, a um caudal constante, $\dot{V}_g$. O objectivo é transferir um dos componentes do gás para a fase líquida (absorção) ou, inversamente, retirar para a corrente gasosa um determinado soluto que se encontre dissolvido no líquido (desabsorção, ou usando o termo inglês correntemente adoptado, *stripping*).

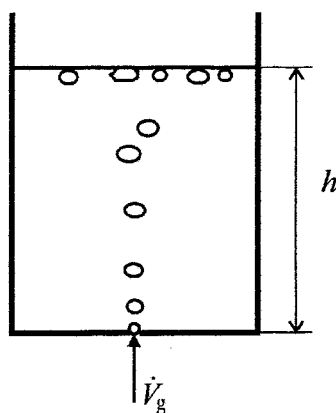


Figura 2.1 - Coluna de borbulhamento com um orifício central

Em colunas de borbulhamento pouco profundas, em que a razão h/D_c é da ordem de grandeza da unidade, a agitação do líquido imposta pelo borbulhamento de gás (que pode ser injectado por um ou mais orifícios, consoante o volume total de líquido na coluna) é normalmente suficiente para assegurar uniformidade de concentrações no líquido, em cada instante, o que simplifica o tratamento teórico da situação.

Considerar-se-á apenas o caso particular de gases muito pouco solúveis no líquido, como sejam oxigénio ou azoto em água (Apêndice C.2), pelo que a resistência à transferência do lado do gás pode ser desprezada, como é demonstrado no Apêndice A.1, e a concentração de soluto no gás será praticamente constante (durante o seu contacto com o líquido) desde a entrada até à saída da coluna (Apêndice A.2).

O modelo teórico mais simples corresponderia a considerar um coeficiente de transferência de massa médio, k_L (que, por facilidade de escrita, se vai representar apenas por k), para todo o borbulhador, e escrever

$$\dot{n} = kA(C^* - C) \quad (2.1)$$

em que A representa a área interfacial total de contacto, C^* a concentração de soluto que, no líquido, estaria em equilíbrio com a concentração de soluto no interior das bolhas, e C a concentração de soluto no seio do líquido, no instante considerado.

A validade da lei de Henry nesta situação permite relacionar C^* com a pressão parcial do soluto no gás, p , por uma equação do tipo

$$C^* = Hp \quad (2.2)$$

em que H representa uma constante de proporcionalidade característica do soluto, para uma dada temperatura.

A principal limitação deste modelo reside em tomar-se um valor médio global de k , que cobre a transferência de soluto em várias situações hidrodinamicamente distintas como: as bolhas em formação, as bolhas em ascensão ou, ainda, a renovação do líquido junto da superfície livre. Pode dizer-se que a nossa ignorância sobre $\dot{n}$ foi substituída pela ignorância sobre k (embora com alguma vantagem).

Para se conseguir uma melhor interpretação do processo global de transferência de massa no absorvedor, é necessário imaginar este dividido em regiões, em cada uma das quais a equação (2.1) pode ser escrita com o valor local, correspondente, de k .

No caso presente, parece lógico considerar quatro regiões (assinaladas na figura 2.2) em que os mecanismos de transferência de massa estão associados a processos hidrodinamicamente distintos (figura 2.3). Uma região na vizinhança imediata do orifício, onde ocorre a *formação* das bolhas (I), uma outra através da qual se dá a *subida* das bolhas (II), uma região imediatamente sob a superfície livre do líquido, na qual se acumulam as bolhas que estão prestes a *rebentar* à superfície (III) e, finalmente, a própria *superfície livre* (IV).

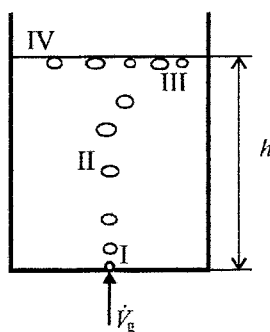


Figura 2.2 - Identificação de quatro regiões distintas na coluna de borbulhamento

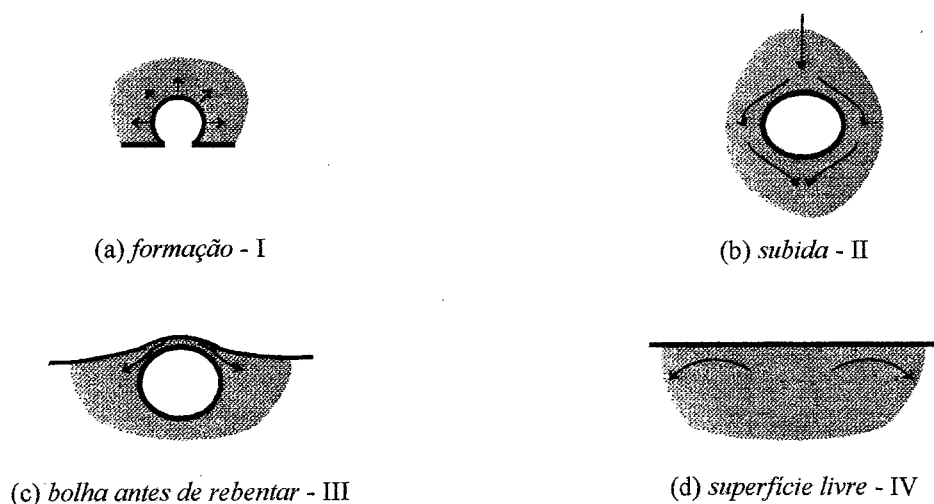


Figura 2.3 - Aspectos hidrodinâmicos associados às diferentes regiões na coluna de borbulhamento
(a) - formação das bolhas, (b) - subida das bolhas no seio do líquido, (c) - bolhas retidas junto à superfície livre e (d) - superfície livre do líquido

Às diferentes regiões, podem associar-se índices (f - formação, s - subida, r - bolhas retidas junto à superfície, sl - superfície livre), de forma a evidenciar o facto de os coeficientes e/ou áreas de transferência respectivos serem distintos. Os valores da taxa de transferência de soluto do gás para o líquido em cada uma dessas zonas, respectivamente, $\dot{n}_I$, $\dot{n}_{II}$, $\dot{n}_{III}$ e $\dot{n}_{IV}$, podem, então, ser expressos por meio das equações

- formação

$$\dot{n}_I = (kA)_f (C^* - C) \quad (2.1.a)$$

- subida ao longo da altura h

$$\dot{n}_{II} = (kA)_s (C^* - C) = (ka^*)_s h (C^* - C) \quad (2.1.b)$$

- bolhas retidas junto à superfície

$$\dot{n}_{III} = (kA)_r (C^* - C) \quad (2.1.c)$$

- superfície livre do líquido

$$\dot{n}_{IV} = (kA)_{sl} (C^* - C) \quad (2.1.d)$$

Note-se que em (2.1.b) se considerou $A_s = a_s^* h$, em que a_s^* representa a área de transferência por unidade de altura, na região de subida das bolhas, considerando-se desprezável a variação da pressão hidrostática, para o sistema em estudo; a vantagem desta desagregação do valor de A_s será melhor entendida adiante.

Adicionando as quatro equações, obtém-se a taxa global de transferência de soluto para o líquido, em qualquer instante,

$$\dot{n} = \left[(kA)_f + (ka^*)_s h + (kA)_r + (kA)_{sl} \right] (C^* - C) \quad (2.3)$$

que, comparada com a equação (2.1), permite escrever

$$\dot{n} = (kA)_{\text{global}} (C^* - C) \quad (2.4)$$

com

$$(kA)_{\text{global}} = (kA)_f + (ka^*)_s h + (kA)_r + (kA)_{sl} \quad (2.5)$$

O objectivo do estudo experimental aqui apresentado foi tentar quantificar a taxa de transferência em cada uma das zonas consideradas, determinando os correspondentes coeficientes de transferência. A forma como esse estudo foi conduzido partiu de algumas considerações simples, que a seguir se expõem (secção 2.2.1).

2.2 MÉTODO EXPERIMENTAL

2.2.1 Base do método

Considerando de novo a coluna de borbulhamento esquematizada na figura 2.2, imagine-se que está a ocorrer absorção de oxigénio do ar para a água. O número total de moles de soluto que passa para o líquido, num curto intervalo de tempo, é igual à soma do número de moles transferido pela bolha em formação, pelas várias bolhas em ascensão no líquido, pelas bolhas que se encontram retidas junto à superfície e ainda através da própria superfície livre. Em princípio, estas diferentes contribuições para a taxa global de absorção são função do caudal de borbulhamento, do diâmetro do orifício, e da altura de líquido na coluna.

É interessante analisar o que se passa quando, mantidas as restantes condições, se varia a altura de líquido. Se a altura de líquido considerada fosse superior a h , o número de bolhas a subir, naquele mesmo instante, ao longo do líquido, seria maior. Esse acréscimo de área interfacial contribuiria para uma maior taxa de transferência, das bolhas em ascensão para o

líquido. Inversamente, se se reduzisse a altura de líquido, diminuiria a taxa de transferência associada às bolhas em subida. Considerando que estas variações em h não iriam alterar significativamente o mecanismo de formação das bolhas, nem o número de bolhas retidas junto à superfície, a contribuição das taxas de transferência relativas a estas duas regiões para o valor global da taxa de transferência de oxigénio provavelmente não seria modificada. Consequentemente, em termos relativos, a contribuição das parcelas correspondentes às bolhas em formação e às bolhas retidas junto à superfície livre - i.e. aos *extremos* da coluna - é tanto mais importante quanto menor for a altura de líquido.

Hipoteticamente, se fosse possível reduzir h a um valor (praticamente) nulo, situação em que também não existiriam bolhas retidas junto à superfície de líquido, a taxa de transferência medida nessas condições seria exclusivamente atribuível à formação das bolhas. Sendo fisicamente impossível proceder a uma tal experiência, pode, no entanto, estudar-se a variação da taxa global de transferência (excluída a superfície livre) com a variação da altura de líquido, e extrapolar os resultados para um limite de h suficientemente pequeno.

O resultado de um tal procedimento está ilustrado na figura 2.4 e, sendo linear a variação da taxa de transferência com a altura, a ordenada na origem informa-nos quanto à taxa de transferência nos extremos e o declive depende da taxa de transferência das bolhas em ascensão (equações (2.4) e (2.5)).

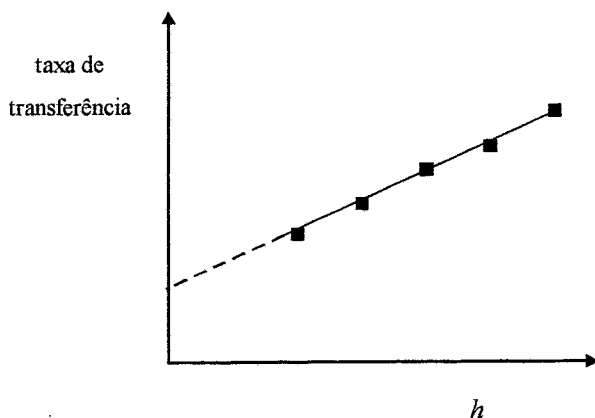


Figura 2.4 - Variação da taxa de transferência do soluto no borbulhador, com a altura de líquido (excluída a superfície livre)

Põe-se agora o problema de conseguir determinar separadamente as diferentes contribuições para a ordenada na origem. O método adoptado tornar-se-á claro com a descrição dos vários tipos de experiências realizadas.

2.2.2 Descrição dos vários tipos de experiências

A medida da taxa de transferência ($\dot{n}$) de um dado componente, numa coluna de borbulhamento, pode ser feita, com algumas vantagens, em condições de estado estacionário. Salienta-se, por exemplo, o facto de se poderem “ignorar”, dessa forma, os atrasos dinâmicos dos elementos de medida utilizados. No presente trabalho adoptou-se esse procedimento.

i) Experiências tipo A - Absorção de oxigénio na coluna de borbulhamento

Nestes ensaios, pretende-se medir a taxa global de absorção de oxigénio numa coluna de borbulhamento, a operar em estado estacionário. A instalação está esquematizada na figura 2.5.

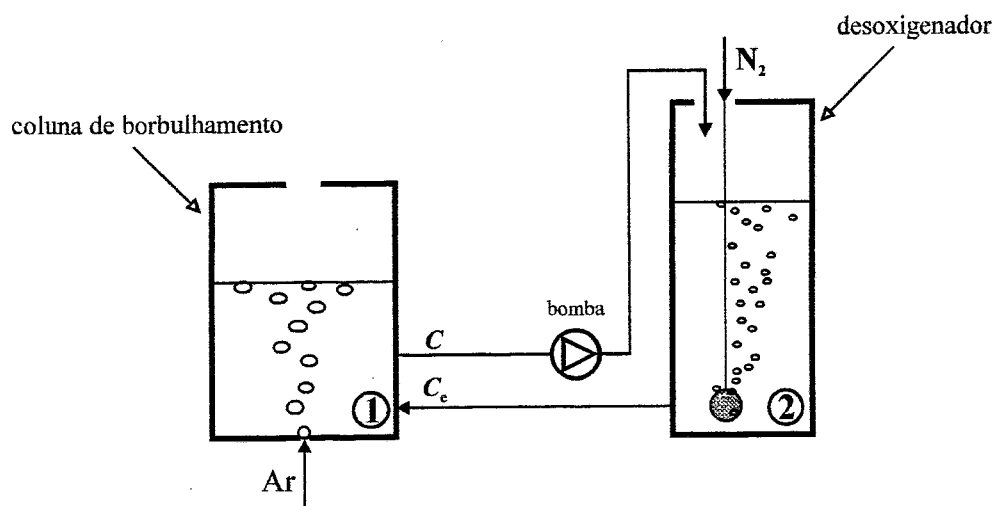


Figura 2.5 - Absorção de oxigénio numa coluna de borbulhamento (1), em estado estacionário

A coluna de borbulhamento 1 contém água até uma determinada altura, e nela borbulha ar, a um caudal constante. No desoxigenador 2 borbulha azoto e, por meio de uma bomba, a água é continuamente transferida de 1 para 2, a caudal constante, sendo o percurso inverso, ao mesmo caudal, assegurado pela acção da gravidade.

Uma vez que a pressão parcial de oxigénio nas bolhas de azoto é sempre muito próxima de zero (Apêndice A.2), parte do oxigénio dissolvido na água é transferido para a corrente gasosa, na coluna 2 (desabsorção). O estado estacionário é atingido quando o oxigénio “ganho” pela água na coluna 1, lhe é “retirado” pela corrente de azoto, na coluna 2; numa tal situação, as concentrações de oxigénio dissolvido na água, à entrada e à saída da(s) coluna(s) deixarão de variar ao longo do tempo.

Se $\dot{v}_L$ representar o caudal (constante) de circulação de líquido entre as duas colunas, o número de moles de oxigénio transferido, por unidade de tempo, em estado estacionário, do ar para a água, na coluna 1, será dado por

$$\dot{n} = \dot{v}_L (C - C_e) \quad (2.6)$$

em que C e C_e representam as concentrações de oxigénio dissolvido na água à saída e à entrada da coluna, respectivamente.

Esta taxa global de absorção na coluna de borbulhamento pode ser facilmente determinada desde que se conheçam as três variáveis, $\dot{v}_L$, C e C_e , e resulta da absorção nas quatro regiões distintas do absorvedor. Note-se que C é também a concentração de oxigénio dissolvido no interior do absorvedor, dado que aí o líquido pode ser considerado como perfeitamente misturado.

ii) Experiências tipo B - Absorção de oxigénio através da superfície livre do líquido

Considere-se agora a situação representada na figura 2.6. Nas duas colunas borbulha azoto e, junto à superfície livre do líquido na coluna 1, faz-se passar uma corrente de ar, de caudal muito elevado, capaz de dispersar quase instantaneamente o azoto emergente do líquido. Desta forma, cria-se aí uma atmosfera de composição próxima da do ar (~21%

de O_2), sendo a concentração de oxigénio nesta atmosfera determinada experimentalmente, para verificação.

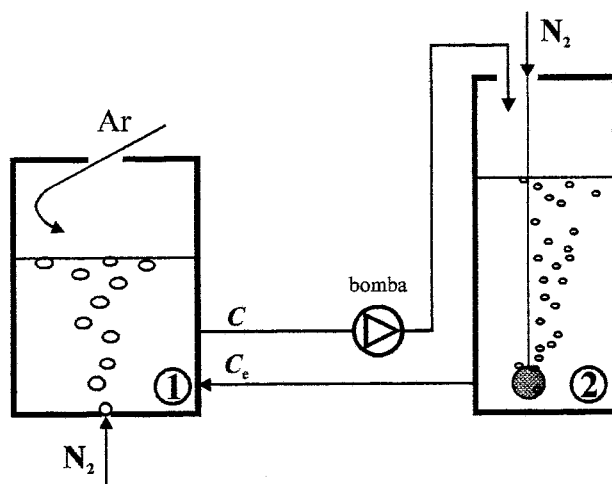


Figura 2.6 - Absorção de oxigénio através da superfície livre do líquido na coluna 1

A absorção de oxigénio do ar pela água, na coluna 1, ocorrerá agora unicamente através da superfície livre do líquido. Contudo, uma vez que está a borbolar azoto, nessa coluna, parte do oxigénio que a água recebe, pela superfície livre, é retirado pelas bolhas de azoto. A taxa global de dissolução de oxigénio na água é ainda calculada pela equação (2.6), com os valores medidos, nesta situação, de $\dot{v}_L$, C e C_e . Contudo, como se viu, essa taxa não representa toda a transferência de oxigénio através da superfície livre para a água, uma vez que parte do oxigénio absorvido na superfície livre é removido, no interior do borbulhador, pelas bolhas de azoto. O tratamento adequado destes resultados para a determinação da taxa real de transferência pela superfície livre será indicado mais adiante (secção 2.3.2).

2.2.3 Instalação experimental

Na figura 2.7 está representada esquematicamente, com mais pormenor, a instalação em que foram realizadas as experiências, em estado estacionário, para determinação dos

coeficientes de transferência de massa, numa coluna com borbulhamento através de orifício central (coluna 1).

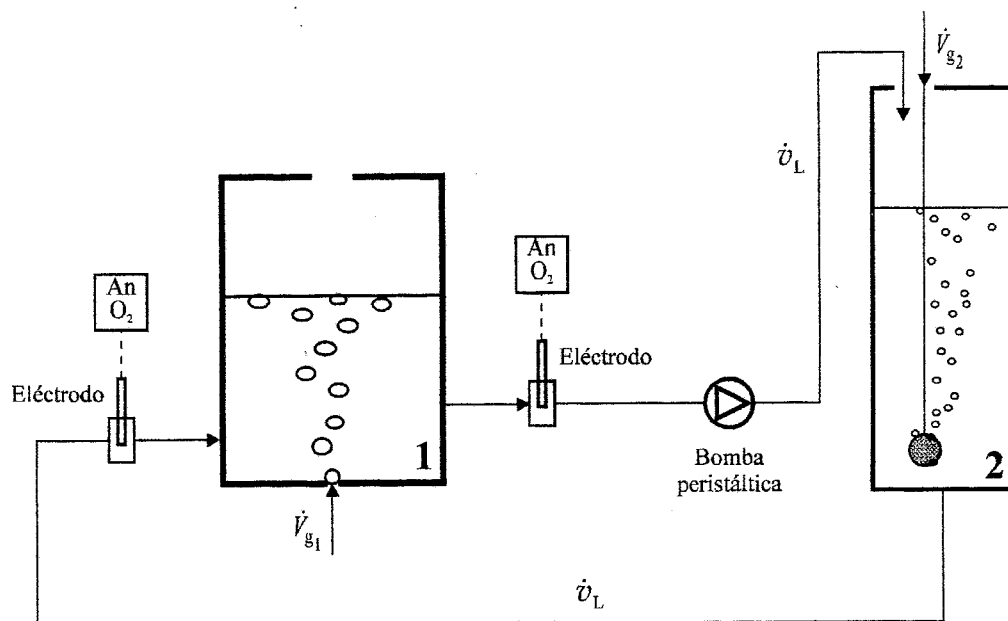


Figura 2.7 - Esquema da instalação experimental

Para absorção de oxigénio na coluna 1, a água (a temperatura constante) era impulsionada de 1 para 2 por uma bomba peristáltica e retornava de 2 para 1 por “gravidade”, sendo desta forma mantida a circular a caudal constante entre as duas colunas.

Estando ar a borbulhar na coluna 1, a caudal constante, e havendo borbulhamento de azoto em 2 (através de um difusor poroso), o “estado estacionário” era atingido ao fim de um tempo da ordem dos 10 a 30 minutos (consoante o valor dos caudais de borbulhamento). A concentração de oxigénio dissolvido era continuamente medida, por eléctrodos polarográficos, à saída e à entrada da coluna 1, e o caudal de líquido, $\dot{v}_L$, era medido, a intervalos de tempo, por extravasamento de uma pequena porção de líquido para uma proveta graduada, com cronometragem do tempo de recolha e posterior devolução, ao sistema, do líquido recolhido. Os caudais de borbulhamento ($\dot{V}_{g1}$ e $\dot{V}_{g2}$) eram medidos por rotâmetros

previamente calibrados. O gás admitido na coluna 1 passava previamente num borbulhador (que não está representado na figura), para ser saturado com vapor de água.

2.2.4 Descrição detalhada das principais peças de equipamento

i) Coluna 1

Por se tratar do sistema de borbulhamento em estudo, a coluna 1 é representada isoladamente na figura 2.8, em dois semi-cortes verticais e em planta.

A coluna é cilíndrica (diâmetro interno de 100 mm e altura total de 280 mm) e em acrílico transparente, e contém quatro anteparos verticais, rectangulares, com 10 mm de largura, colados sobre a parede interna. O furo central foi executado sobre uma placa quadrangular de latão, que se aparafusava sobre a base do borbulhador. Foram construídas três dessas placas com furos centrais de 0,2, 0,3 e 3,0 mm. A vedação entre a base da coluna e a placa metálica era assegurada por um “o-ring”.

A saída e a entrada de líquido eram feitas através de dois orifícios na parede cilíndrica da coluna, a cerca de 35 mm da base e afastadas entre si de um quadrante.

A saída tinha a particularidade de ligar, no lado interno da coluna, a um cotovelo aí encaixado e que podia ser rodado (ver corte do lado direito). Impedia-se assim a “aspiração” de bolhas de gás e, em determinadas condições de borbulhamento, afastava-se o ponto de drenagem do líquido de zonas de menor circulação, que se podem encontrar na parte inferior da coluna, perto da parede. Foi fixada na parede externa da coluna uma escala milimétrica, para medição do nível de líquido.

O topo da coluna era aberto para a atmosfera, para a saída do gás, sendo possível nos ensaios do tipo B, utilizar também essa abertura para introduzir ar, através de um tubo flexível, com o objectivo de alterar a composição da atmosfera em contacto com o líquido. Nessa situação, o tubo era orientado tangencialmente em relação à superfície livre do líquido, como se esquematiza na figura 2.9, de modo a que o gás não provocasse alterações significativas na forma desta superfície (maior turbulência ou vórtices localizados).

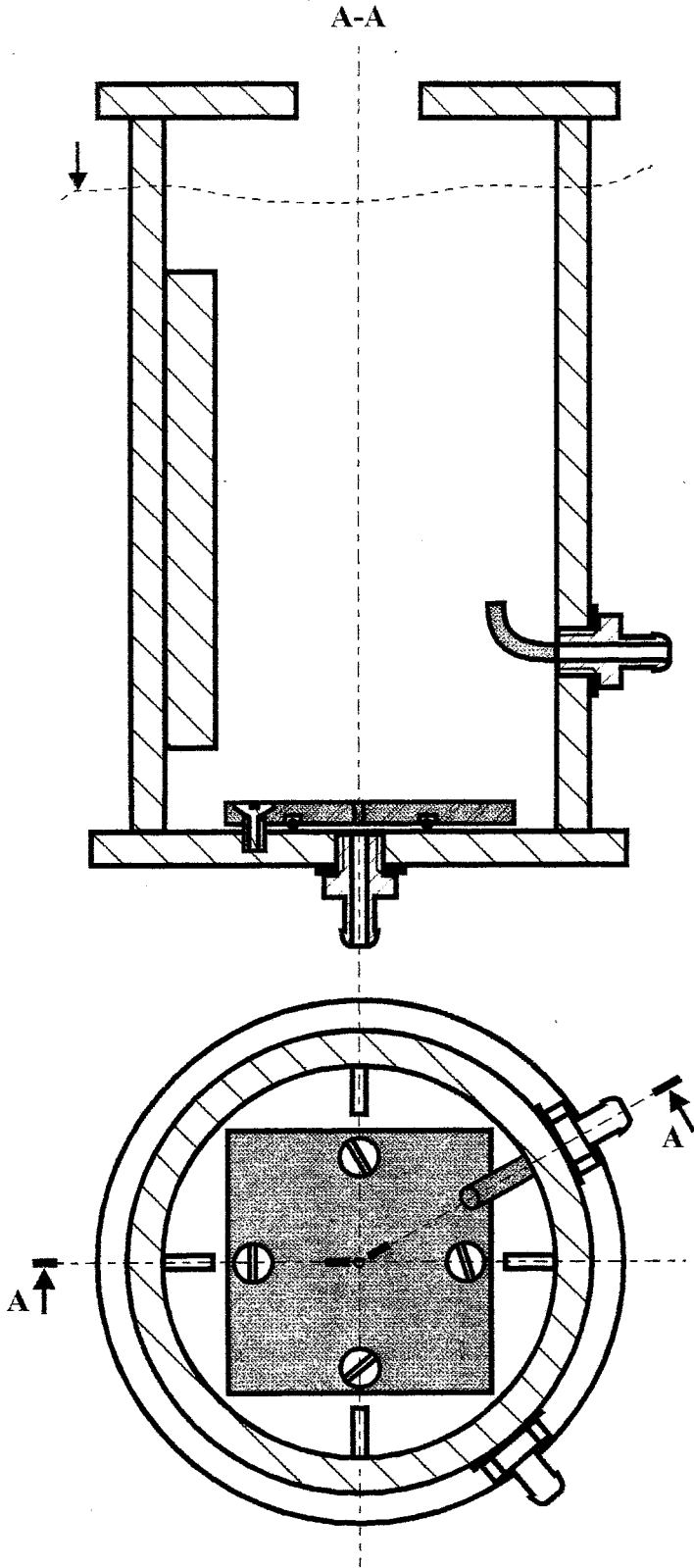


Figura 2.8 - Semi-cortes verticais e vista de cima do borbulhador principal

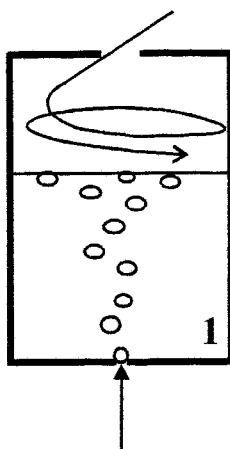


Figura 2.9 - Ilustração da injeção de gás junto à superfície livre do líquido, na coluna 1

ii) Coluna 2

A coluna de desabsorção era igualmente cilíndrica (diâmetro interno de 52 mm, altura total de 400 mm) e em acrílico transparente.

A admissão de gás era feita através de um difusor poroso de cerâmica, mergulhado no líquido, como se ilustra na figura 2.7.

iii) Células para suporte dos eléctrodos de oxigénio

Uma das principais exigências na utilização de eléctrodos de oxigénio (do tipo polarográfico), é garantir uma boa agitação do líquido junto ao eléctrodo. Pretendendo-se medir em contínuo a concentração de oxigénio dissolvido à entrada e à saída da coluna 1, foi necessário construir uma célula de suporte especial para cada eléctrodo, conforme se representa esquematicamente nas figuras 2.10 (perspectiva) e 2.11 (semi-cortes, com e sem o eléctrodo, e planta).

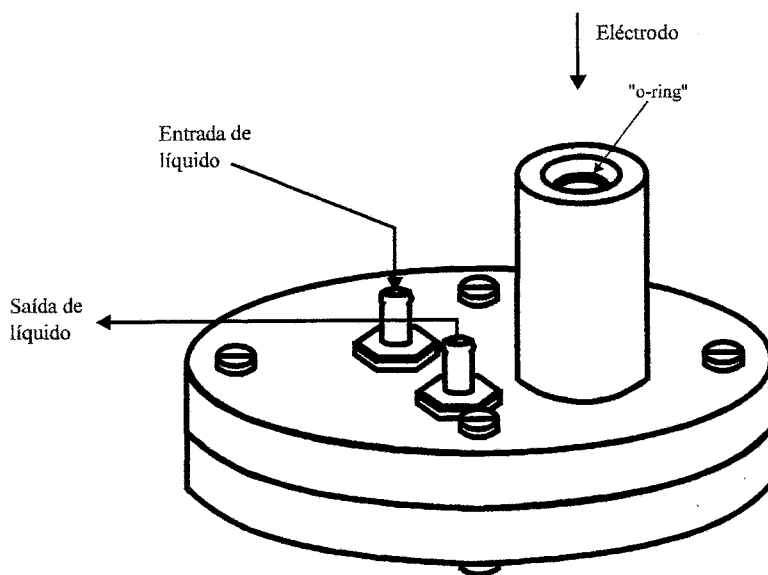


Figura 2.10 - Célula para suporte do eléctrodo de oxigénio, para medições em linha

Estas células, construídas em acrílico, possuem uma entrada e uma saída contínua de líquido. O líquido em circulação ocupa um volume útil de cerca de $15 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ sobre a base plana da célula, onde se coloca uma pequena barra magnética. O suporte propriamente dito do eléctrodo é um tubo, colado na perpendicular (ver figura 2.11), que o mantém em contacto permanente com o líquido. No decorrer dos ensaios, esta unidade ficava totalmente vedada para a atmosfera e, mantendo a célula assente sobre um agitador magnético, assegurava-se uma perfeita agitação do líquido junto à membrana do eléctrodo.

2.2.5 Medição e regulação dos diferentes parâmetros

i) Caudais de gás

Os caudais de gás eram medidos, rigorosamente, utilizando rotâmetros em linha, previamente calibrados, segundo a disposição esquematizada na figura 2.12.

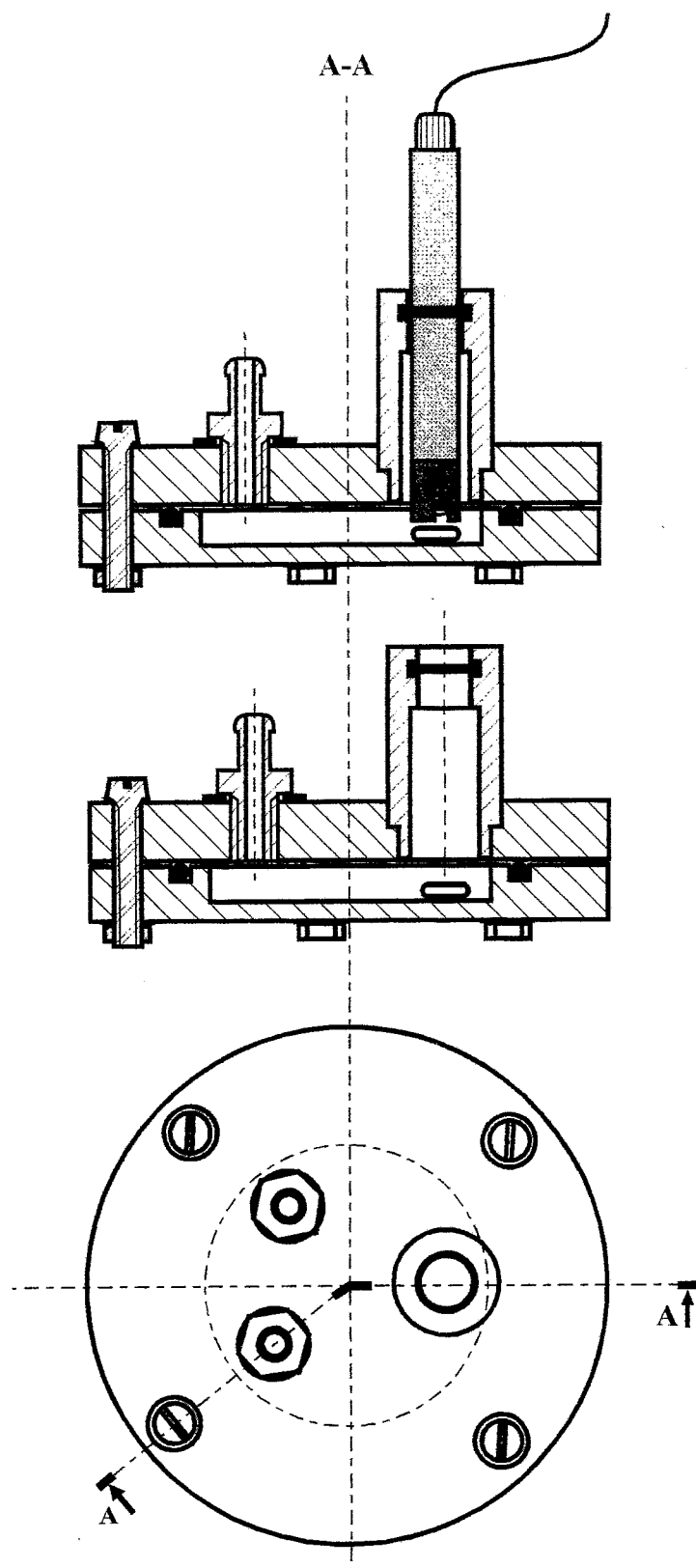


Figura 2.11 - Semi-cortes verticais (com e sem eléctrodo) e vista de cima da célula para suporte do eléctrodo de oxigénio

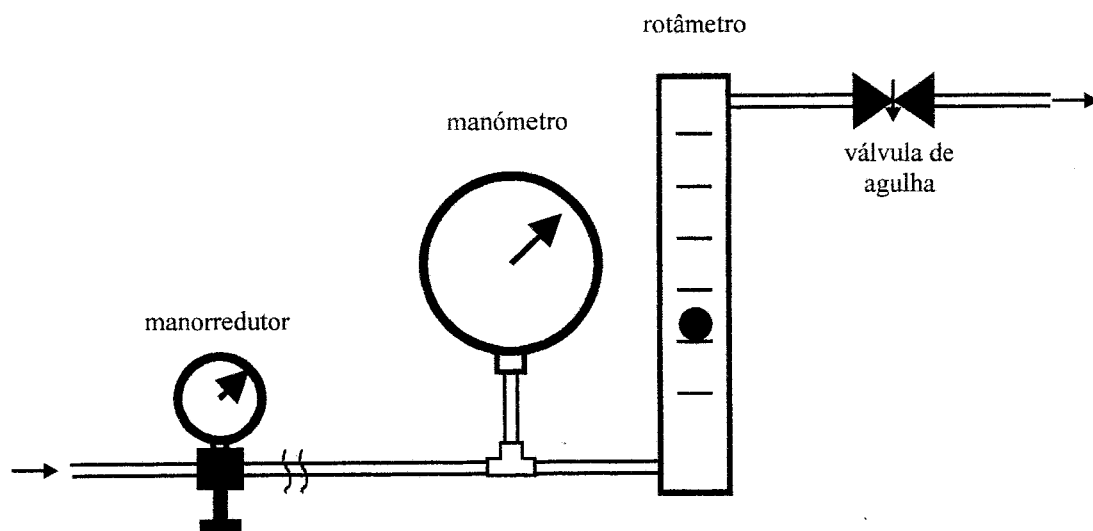


Figura 2.12 - Regulação e medição dos caudais de gás

O manómetro colocado a montante e muito próximo do rotâmetro permitia medir a pressão no interior deste e ajustá-la à pressão de calibração, através do manorredutor. O caudal de gás era regulado com a válvula de agulha, colocada a jusante do rotâmetro.

ii) Concentração de oxigénio dissolvido no líquido

Como já foi referido, utilizaram-se eléctrodos polarográficos (duplo eléctrodo), ligados a analisadores de oxigénio da marca WTW, modelos Oxi 537 e Oxi 521, ou da marca Metrohm, modelo 627 O₂-Meter, para medir a concentração de oxigénio dissolvido nas correntes de entrada e saída da coluna 1. A verificação do bom funcionamento dos eléctrodos era um cuidado essencial, dada a sua grande sensibilidade. A respectiva calibração (executada de acordo com o estipulado nos respectivos manuais) era feita com frequência, entre ensaios. Durante a sua utilização, era fundamental garantir uma boa agitação do líquido junto à membrana e eliminar quaisquer bolhas de gás, eventualmente retidas nessa zona, e responsáveis por falsas leituras.

iii) Concentração de oxigénio em fase gasosa

Em determinadas situações, nomeadamente nas experiências tipo B, foi necessário medir a concentração de oxigénio em fase gasosa, na atmosfera em contacto com a superfície livre do líquido, no borbulhador principal. Utilizou-se, então, um analisador de oxigénio gasoso (Servomex O₂ analyser 570A), convenientemente calibrado.

iv) Temperatura e pressão absoluta

Sendo importante trabalhar em condições de temperatura constante, parte da instalação (as duas colunas e o borbulhador utilizado para saturar previamente o gás com vapor de água) foi mantida num banho termostaticado, a uma temperatura de 25°C (25±1°C).

Em cada ensaio era medida a temperatura exacta do líquido no borbulhador, bem como a pressão atmosférica do dia.

2.2.6 Gamas de valores utilizadas para os parâmetros experimentais

Apresentam-se, na tabela 2.1, as gamas de valores seleccionadas para as variáveis cuja influência se pretendeu estudar neste trabalho. São elas o diâmetro do orifício, ϕ , a altura de líquido no borbulhador, h , e o caudal de borbulhamento, $\dot{V}_g^{(1)}$ (relativo à pressão normal e à temperatura ambiente).

Tabela 2.1 - Gamas de valores dos vários parâmetros experimentais

ϕ	h	$\dot{V}_g \times 10^6$
(mm)	(mm)	(m ³ /s)
0,2	60 - 180*	2,3 - 8,0
0,3	60 - 180*	5,0 - 20
3,0	60 - 180*	20 - 50

* com intervalos de 30 mm (i.e. 60, 90, 120, 150 e 180 mm)

⁽¹⁾ $\dot{V}_g \equiv \dot{V}_{g_1}$, indicado na figura 2.7

A escolha de gamas mais baixas de caudais de borbulhamento, para os orifícios mais pequenos, tornou-se necessária para evitar quedas de pressão excessivas nos orifícios.

2.2.7 Sistemas gás-líquido utilizados

Os gases utilizados foram ar e azoto. O primeiro, obtido a partir de um compressor, passava num filtro de óleo antes de ser usado. Quanto ao azoto, era proveniente de garrafas, com uma pureza nunca inferior a 99,99%.

O gás de borbulhamento na coluna 1 (ar ou azoto) era ainda saturado com vapor de água, antes de entrar na coluna, por passagem num borbulhador colocado na linha.

Como líquido, utilizou-se sempre água da torneira; nos ensaios em que se pretendeu eliminar a retenção de bolhas gasosas sob a superfície livre, como se explica na secção seguinte, foi adicionada à água uma pequena quantidade - 0,02% v/v - de agente anti-espuma (polisiloxano, com designação comercial de Fumexol SD, produzido pela Ciba-Geigy).

2.3 DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA A PARTIR DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Mostra-se, de seguida, como as experiências dos tipos A e B, atrás descritas, podem ser conjugadas para obter os valores dos diferentes coeficientes de transferência.

2.3.1 Coeficiente global de transferência de massa

O coeficiente global de transferência de massa, $(kA)_{\text{global}}$, é determinado a partir de ensaios de absorção, em experiências do tipo A. Em cada ensaio, para uma dada altura de líquido na coluna, e para um dado caudal de ar a borbulhar, o débito molar de oxigénio

transferido do ar para a água, no borbulhador, em estado estacionário, é, conforme referido anteriormente (secção 2.2.2), dado por

$$\dot{n} = \dot{v}_L (C - C_e) \quad (2.6)$$

em que $\dot{v}_L$ é o caudal de circulação da água entre as duas colunas e C e C_e são as concentrações molares de oxigénio dissolvido, respectivamente à saída e à entrada do absorvedor. Note-se que, dadas as condições de boa agitação do líquido nos borbulhadores, C é igual à concentração de oxigénio no líquido, no interior do absorvedor. Nas condições experimentais, o valor de $\dot{n}$, dado pela equação (2.6), corresponde ao débito de oxigénio transferido do ar para a água, no borbulhador, quer através das bolhas (em formação, subida, ou enquanto retidas junto à superfície livre do líquido) quer também através da superfície livre do líquido. E como a pressão parcial de soluto no gás é praticamente constante, durante o tempo em que este permanece em contacto com o líquido, a concentração de soluto nas interfaces será C^* e, portanto,

$$\dot{n} = (kA)_{\text{global}} (C^* - C) \quad (2.4)$$

Conjugando as equações (2.4) e (2.6), obtém-se

$$(kA)_{\text{global}} = \frac{\dot{v}_L (C - C_e)}{(C^* - C)} \quad (2.7)$$

O valor de C^* foi obtido, em cada ensaio, para as condições de temperatura e pressão absoluta registadas, a partir de valores tabelados da solubilidade de oxigénio em água em contacto com ar saturado em vapor de água (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1981). A correcção dos valores tabelados de acordo com a temperatura e pressão registadas é indicada em Apêndice (Apêndice B.1).

2.3.2 Coeficiente de transferência de massa relativo à superfície livre do líquido

A determinação dos valores de $(kA)_{sl}$ foi feita através da realização de ensaios do tipo B. Nestes ensaios, como se explicou na secção 2.2.2, borbulhava-se azoto através do orifício do borbulhador principal, ocorrendo a transferência de oxigénio do ar para a água (absorção), apenas através da superfície livre do líquido. Como junto a esta superfície se impunha uma atmosfera de ar, a transferência de oxigénio para o líquido ocorria à taxa

$$\dot{n}_{IV} = (kA)_{sl}(C^* - C) \quad (2.1.d)$$

em que C^* representa a concentração de oxigénio que, na água, estaria em equilíbrio com a concentração de oxigénio no ar.

Contudo, este valor de $\dot{n}_{IV}$ é diferente do valor experimental de $\dot{n} = \dot{v}_L(C - C_e)$, determinado para esta situação, pois no interior do borbulhador há transferência de oxigénio do líquido para as bolhas, nas quais a pressão parcial de oxigénio é praticamente nula (e, portanto, $C^* = 0$). Assim, nas regiões I (*formação*), II (*subida*) e III (*bolhas retidas* junto à superfície), a taxa de oxigénio transferido da água para as bolhas de azoto (desabsorção) é

$$\dot{n}_I + \dot{n}_{II} + \dot{n}_{III} = \left[(kA)_f + (ka^*)_s h + (kA)_r \right] (0 - C) \quad (2.8)$$

A taxa global de transferência de oxigénio para o líquido é, então,

$$\dot{n} = \left[(kA)_f + (ka^*)_s h + (kA)_r \right] (0 - C) + (kA)_{sl}(C^* - C) \quad (2.9)$$

e é de referir que, em termos de áreas interfaciais e coeficientes de transferência, o borbulhamento deve ser praticamente insensível à substituição de ar por azoto, dada a larga preponderância deste elemento no ar.

Como, da equação (2.5), resulta $\left[(kA)_f + (ka^*)_s h + (kA)_r \right] = \left[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{sl} \right]$, conclui-se ser

$$\dot{n} = (kA)_{\text{global}}(0 - C) + (kA)_{\text{sl}} C^* \quad (2.10)$$

em que $(kA)_{\text{global}}$ é o coeficiente global de transferência previamente determinado nas experiências do tipo A (secção 2.3.1), em condições experimentais idênticas (i.e. com os mesmos orifício, caudal de gás e altura de líquido na coluna).

A taxa de oxigénio retida pelo líquido é dada pela equação (2.10) e experimentalmente determinada de

$$\dot{n} = \dot{v}_L (C - C_e) \quad (2.6)$$

Portanto, o valor de $(kA)_{\text{sl}}$ obtém-se como

$$(kA)_{\text{sl}} = \frac{\dot{v}_L (C - C_e) + (kA)_{\text{global}} C}{C^*} \quad (2.11)$$

onde C^* representa, tal como se disse anteriormente, a concentração de oxigénio na água que estaria em equilíbrio com a concentração real de oxigénio no ar, nas condições de pressão absoluta e temperatura registadas no ensaio.

2.3.3 Coeficiente de transferência de massa relativo à subida das bolhas no líquido

Fazendo m pares de experiências dos tipos A e B, todas elas para o mesmo caudal de borbulhamento de gás e para m valores distintos de h , ficam a conhecer-se os correspondentes valores de $(kA)_{\text{global}}$ e de $(kA)_{\text{sl}}$, e, por diferença entre eles, os vários valores de $[(kA)_f + (ka^*)_s h + (kA)_r]$, de acordo com a equação (2.5).

Pode assim representar-se, graficamente, $[(kA)_f + (ka^*)_s h + (kA)_r]$ em função de h , obtendo-se, para cada valor do caudal de gás, uma recta de declive $(ka^*)_s$ - coeficiente de

transferência de massa relativo à transferência de soluto durante a subida das bolhas - e de ordenada na origem $[(kA)_f + (kA)_r]$. Para cada orifício, foram realizados ensaios para vários caudais de gás, obtendo-se assim outras tantas rectas, de diferentes declives - $(ka^*)_s$ - e diferentes ordenadas na origem - $[(kA)_f + (kA)_r]$. Esta ordenada na origem é a soma de duas parcelas, das quais uma corresponde à transferência associada à formação das bolhas e a outra se reporta à transferência através das bolhas retidas junto à superfície livre do líquido. Ver-se-á a seguir como se tentaram discriminar estas duas contribuições.

2.3.4 Coeficientes de transferência de massa relativos à formação das bolhas e retenção junto à superfície livre

É sabido que, em colunas de borbulhamento, a adição de uma pequena quantidade de certos agentes tensio-activos ao líquido faz diminuir drasticamente o número de bolhas retidas junto à superfície livre; isto mesmo é ilustrado nas figuras 2.13 e 2.14, onde se compara o borbulhamento de ar em água sem e com Fumexol.

A coluna utilizada para a obtenção destas imagens fotográficas foi uma coluna prismática, quadrangular (com 70 mm de lado), em acrílico transparente e de faces polidas. Na base da coluna era possível aparafusar as mesmas placas de latão, com furos centrais de 0,2, 0,3 e 3,0 mm, que foram utilizadas para a injeção de gás no borbulhador principal (figura 2.8), nos ensaios realizados para o estudo de transferência de massa.

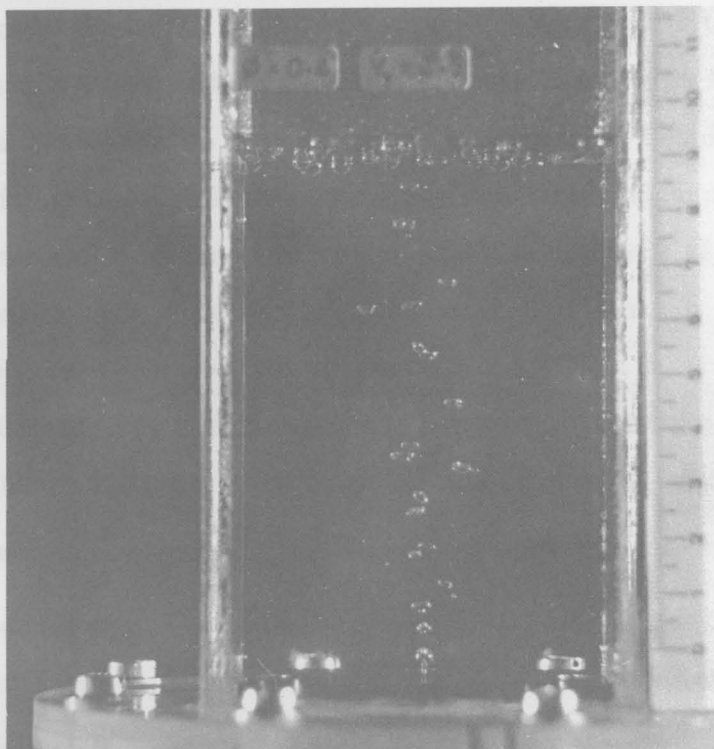


Figura 2.13 - Borbulhamento de ar em água através de um orifício de 0,2 mm, a um caudal de $2,3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

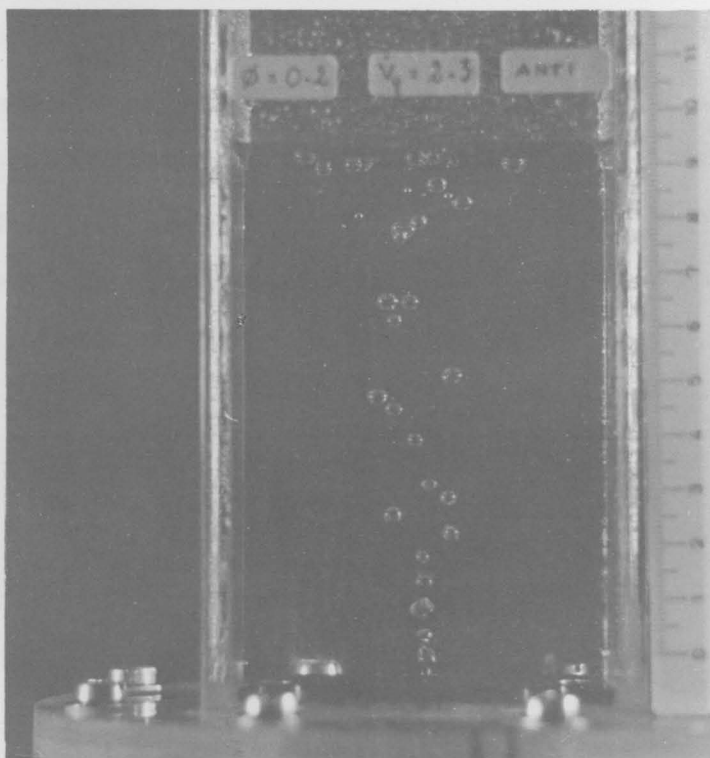


Figura 2.14 - Borbulhamento de ar em água com anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v) através de um orifício de 0,2 mm, a um caudal de $2,3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

Por inspecção das figuras 2.13 a 2.26 constata-se vários efeitos. O reduzido número de bolhas retidas junto à superfície livre, nos casos em que a água contém Fumexol, é notória. Para além disso, a morfologia do borbulhamento no interior do líquido (por exemplo o número e a forma das bolhas) é profundamente alterada por adição de Fumexol, nos casos em que o orifício de injeção é de dimensões muito reduzidas (figuras 2.13 a 2.22). Já para o borbulhamento com o orifício de maiores dimensões (3,0 mm), a adição do agente anti-espuma não se traduz em efeitos visíveis (figuras 2.23 a 2.26).

Face a estas constatações, pode supor-se que por repetição dos ensaios dos tipos A e B, mas agora com uma concentração conveniente de anti-espuma na água, se poderão obter novas funções lineares de $\left[(kA)_f + (ka^*)_s h + (kA)_r \right]$ em função de h , mas em que $(kA)_r \cong 0$, já que é minimizada a presença de bolhas junto à superfície. Nessas circunstâncias, a ordenada na origem das rectas deverá ser aproximadamente igual ao coeficiente de transferência relativo à formação das bolhas, $(kA)_f$.

Conhecido que seja o valor deste parâmetro, poderia finalmente pensar-se em determinar o valor de $(kA)_r$, para cada caudal de borbulhamento, subtraindo $(kA)_f$ ao valor da ordenada na origem, $\left[(kA)_f + (kA)_r \right]$, obtida nos ensaios feitos só com água (secção 2.3.3).

Este foi o procedimento adoptado, mas refira-se desde já que os resultados assim obtidos terão que ser interpretados com cuidado. De facto, só para os borbulhamentos com o orifício maior (figuras 2.23 a 2.26) seria legítimo prever (e ainda aí com alguma reserva, como adiante se verá) que os valores de $(kA)_f$ e $(ka^*)_s$ não são alterados pela adição do agente tensio-activo.

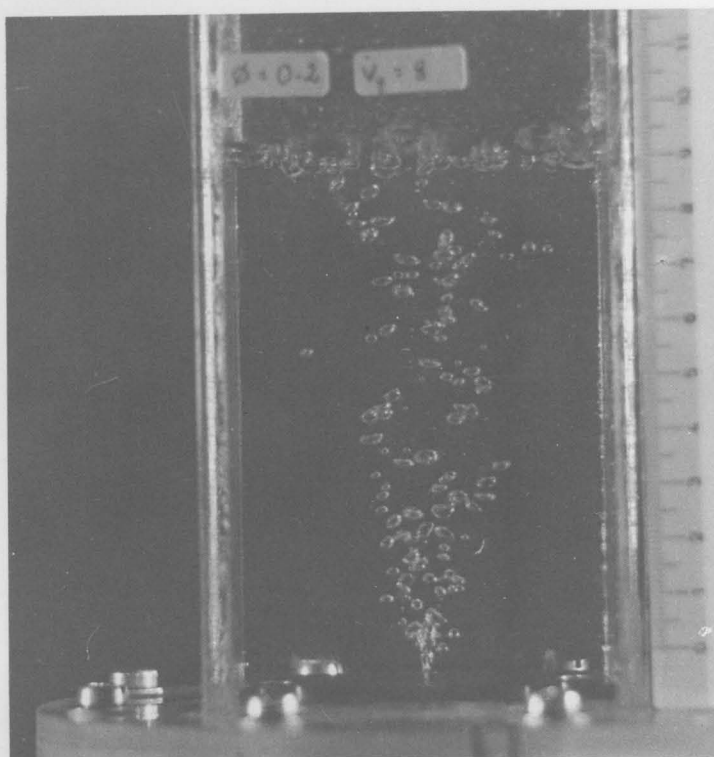


Figura 2.15 - Borbulhamento de ar em água através de um orifício de 0,2 mm, a um caudal de $8,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

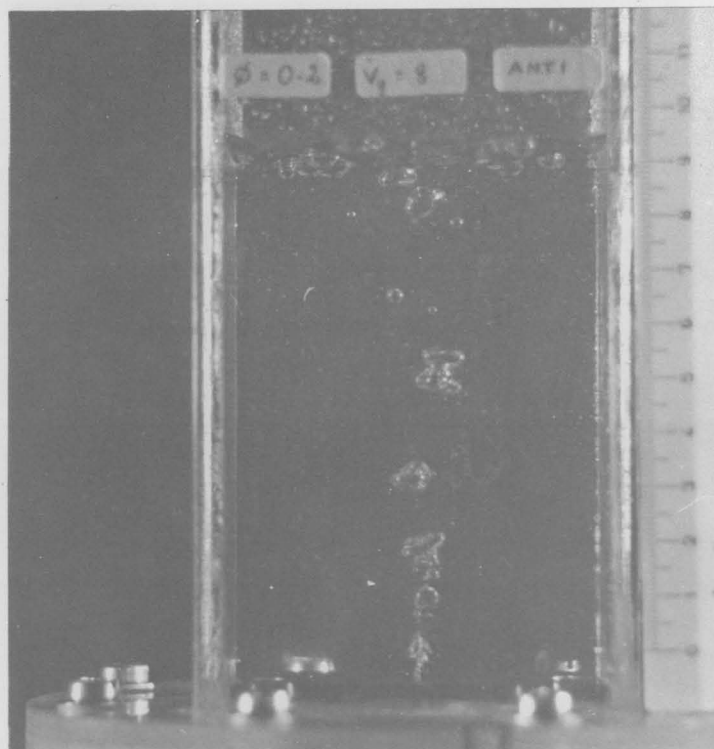


Figura 2.16 - Borbulhamento de ar em água com anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v) através de um orifício de 0,2 mm, a um caudal de $8,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

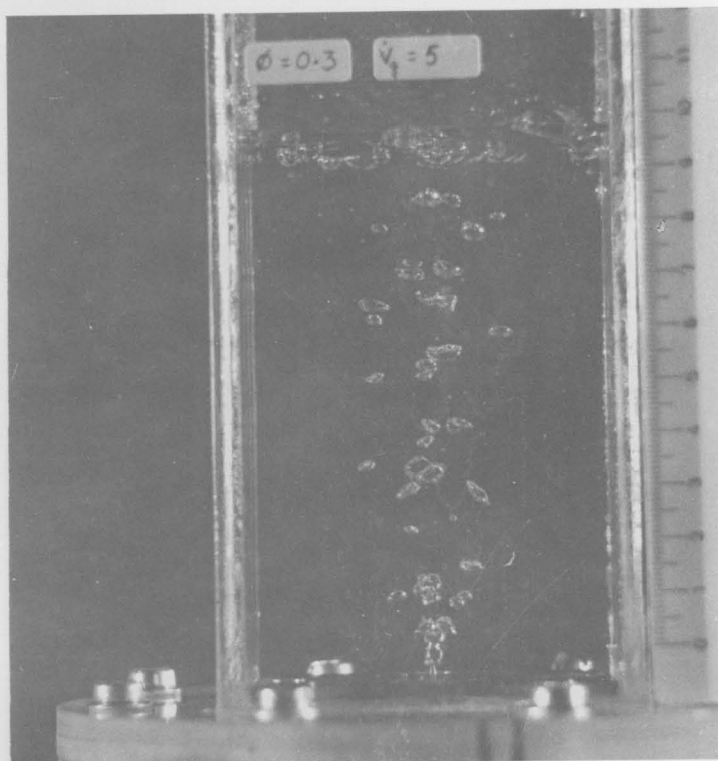


Figura 2.17 - Borbulhamento de ar em água através de um orifício de 0,3 mm, a um caudal de $5,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

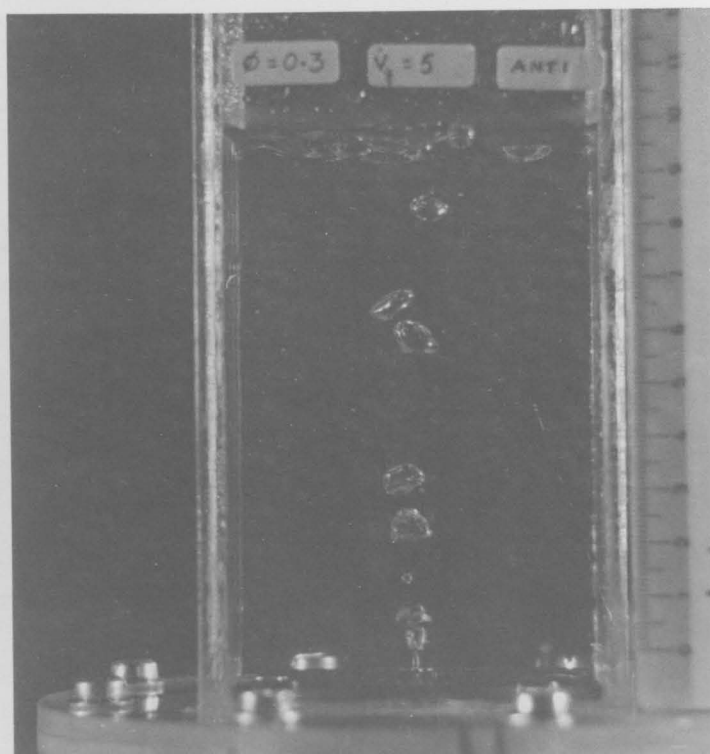


Figura 2.18 - Borbulhamento de ar em água com anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v) através de um orifício de 0,3 mm, a um caudal de $5,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

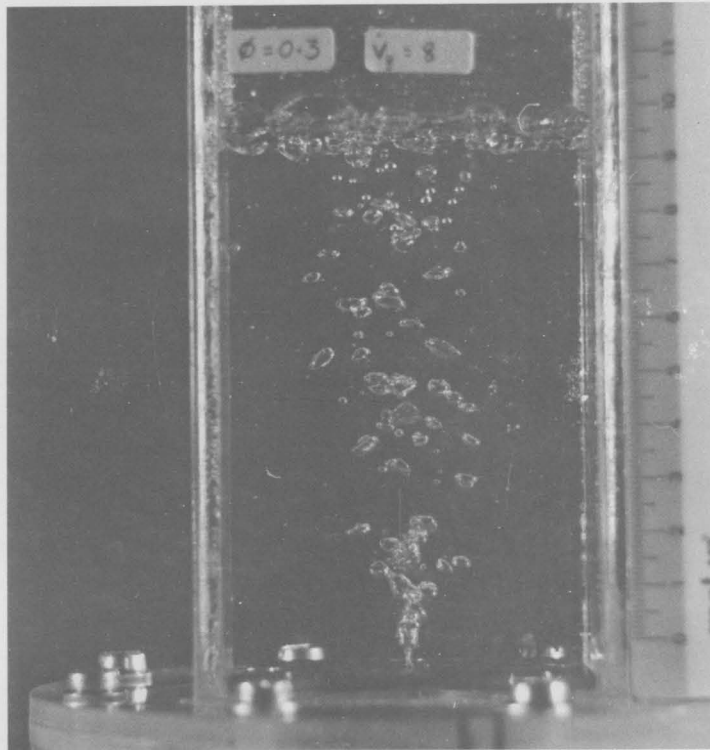


Figura 2.19 - Borbulhamento de ar em água através de um orifício de 0,3 mm, a um caudal de $8,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

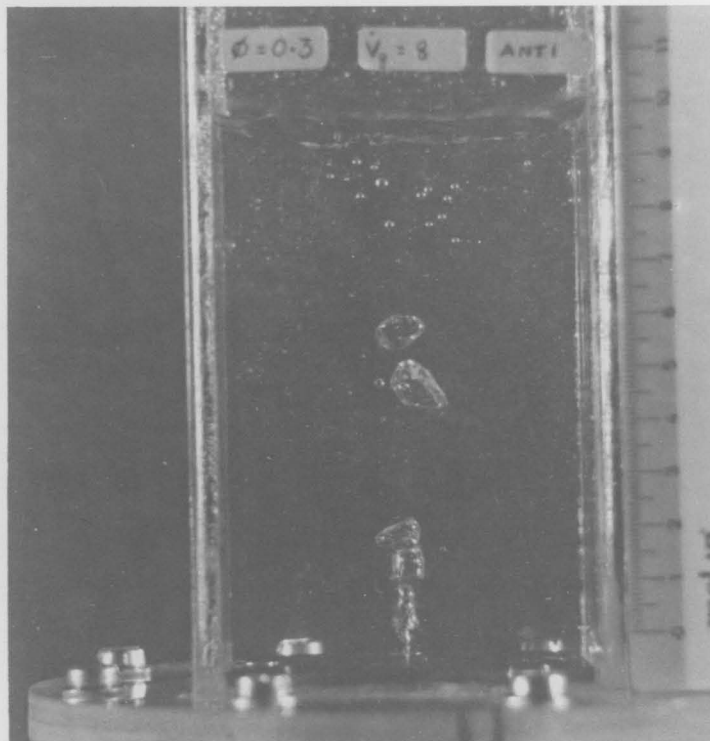


Figura 2.20 - Borbulhamento de ar em água com anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v) através de um orifício de 0,3 mm, a um caudal de $8,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

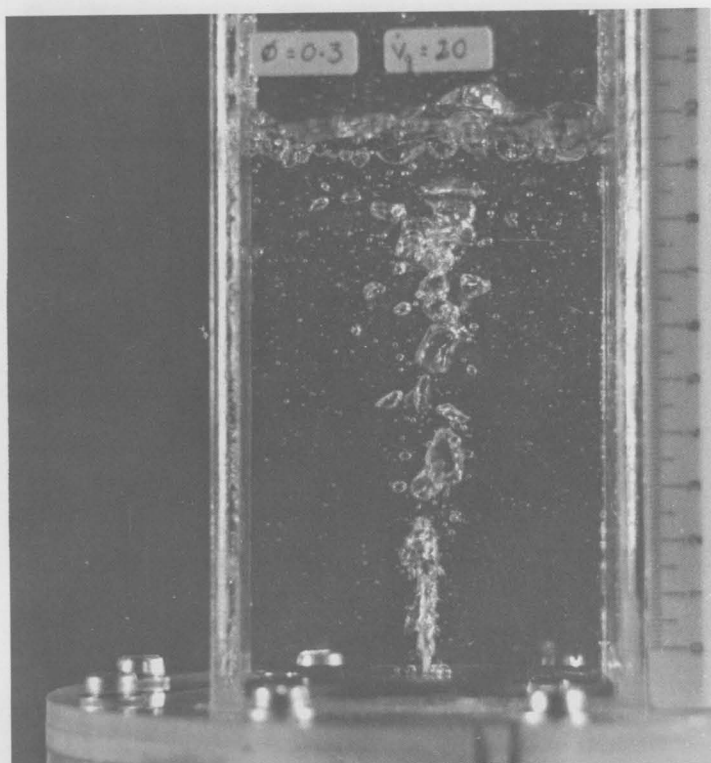


Figura 2.21 - Borbulhamento de ar em água através de um orifício de 0,3 mm, a um caudal de $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

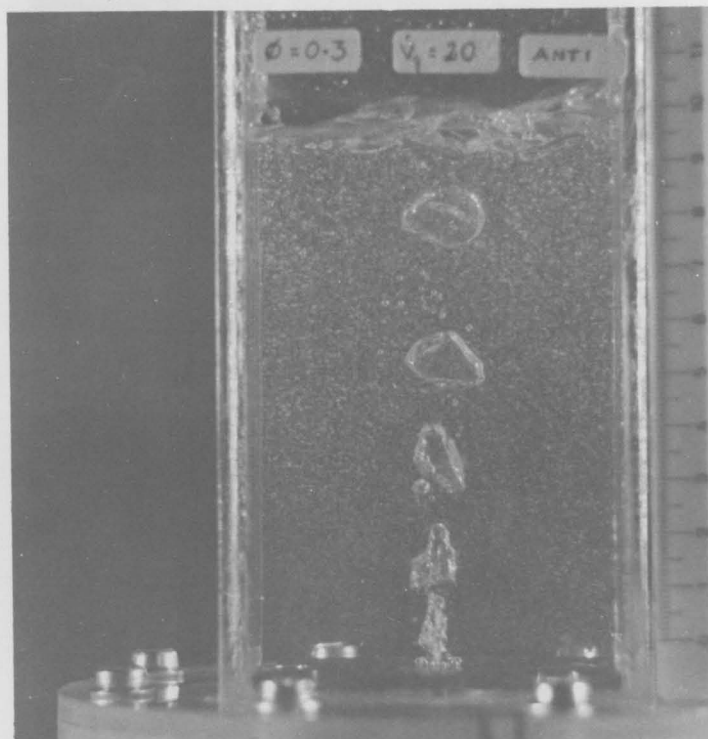


Figura 2.22 - Borbulhamento de ar em água com anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v) através de um orifício de 0,3 mm, a um caudal de $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

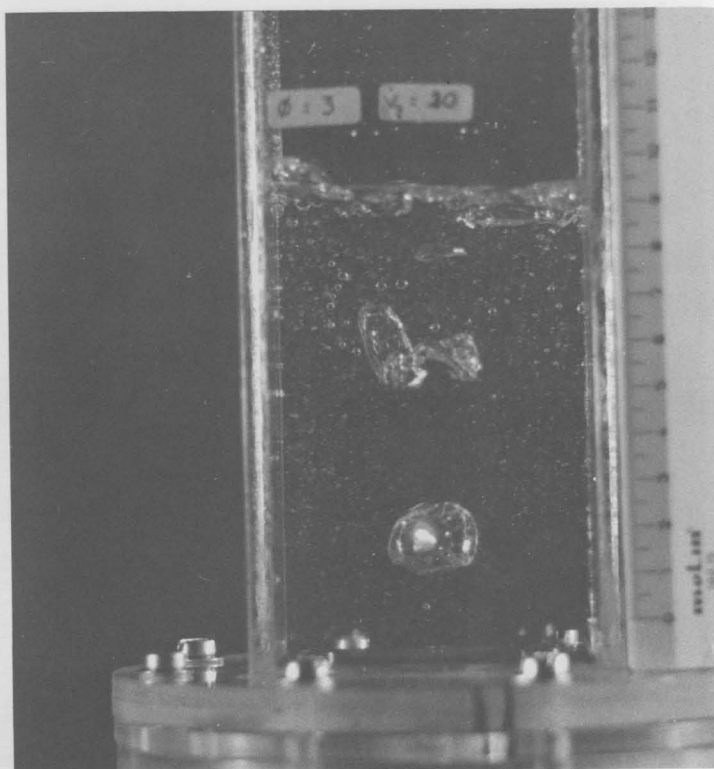


Figura 2.23 - Borbulhamento de ar em água através de um orifício de 3,0 mm, a um caudal de $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

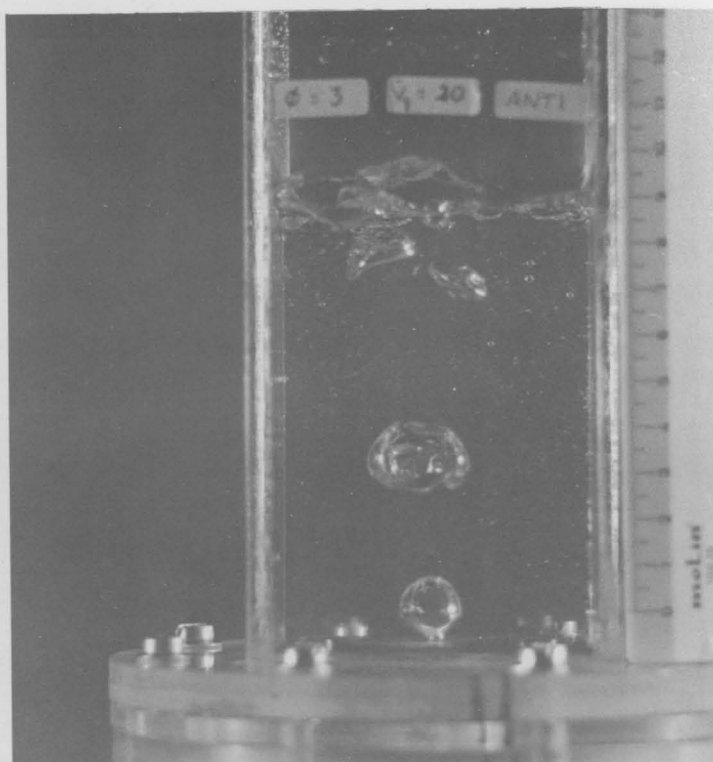


Figura 2.24 - Borbulhamento de ar em água com anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v) através de um orifício de 3,0 mm, a um caudal de $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

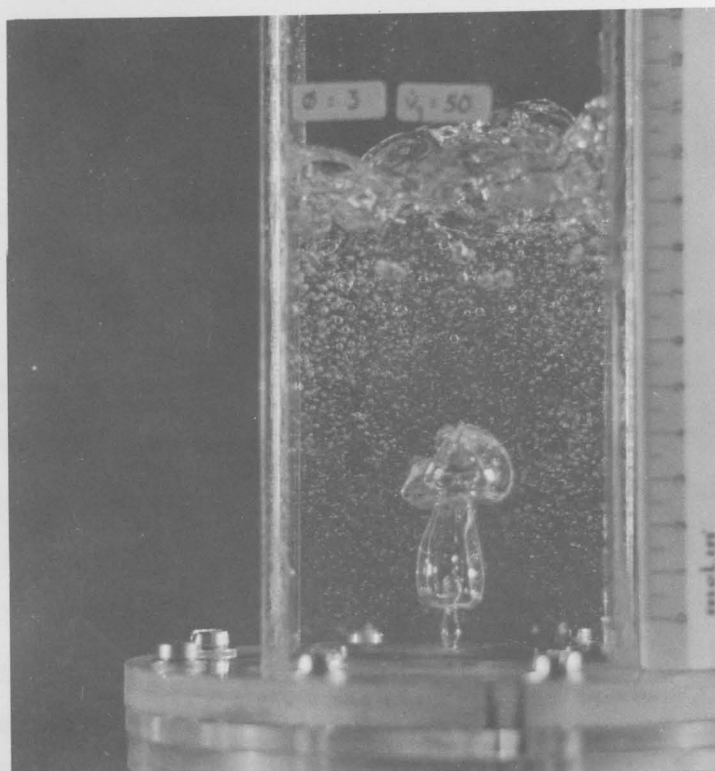


Figura 2.25 - Borbulhamento de ar em água através de um orifício de 3,0 mm, a um caudal de $50 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

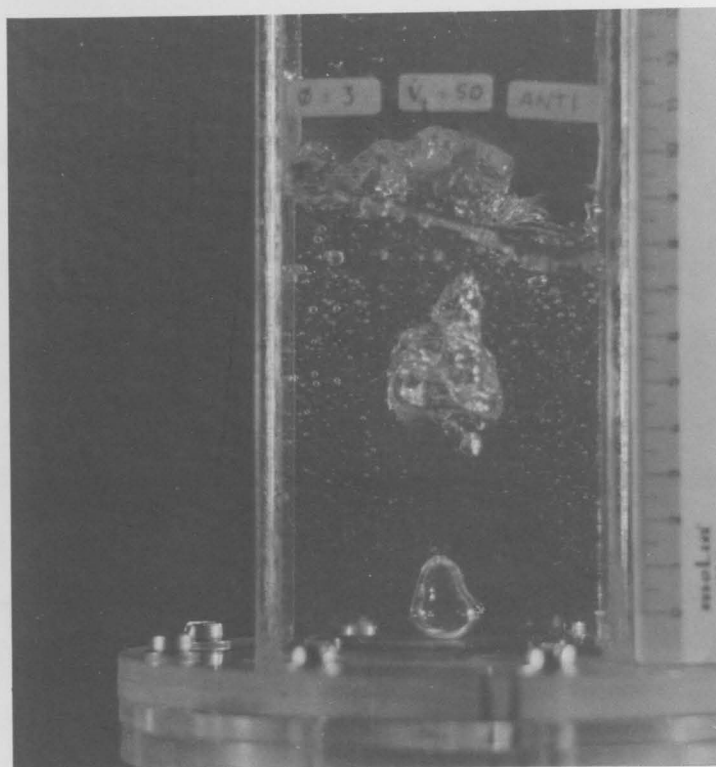


Figura 2.26 - Borbulhamento de ar em água com anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v) através de um orifício de 3,0 mm, a um caudal de $50 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

2.4 RESULTADOS

2.4.1 Resultados experimentais

Borbulhando ar através de cada um dos orifícios, a um caudal conhecido, mediram-se, em estado estacionário, os valores das concentrações de oxigénio à entrada e à saída do borbulhador (em experiências do tipo A), bem como o caudal de recirculação de líquido, para várias alturas de líquido. Os resultados relativos aos vários ensaios, realizados sem e com anti-espuma, estão apresentados em anexo (Apêndice B.1), nas tabelas B.1.1 a B.1.6.

Os resultados experimentais (concentrações de oxigénio dissolvido, caudais de gás, caudal de recirculação de líquido) relativos aos ensaios tipo B, realizados só com água e com água à qual foi adicionado anti-espuma, são apresentados nas tabelas B.1.7 a B.1.12. Relembra-se que, nestes ensaios, a absorção de oxigénio do ar para a água, no borbulhador principal, era limitada à superfície livre do líquido, sobre a qual se impunha uma atmosfera de características idênticas ao ar; em ambas as colunas, borbulhava azoto.

2.4.2 Coeficientes de transferência de oxigénio do ar para a água

i) Coeficientes globais de transferência

Os coeficientes globais de transferência foram obtidos por utilização da equação (2.7), a partir dos valores medidos de concentrações de oxigénio e caudal de recirculação de líquido, apresentados nas tabelas B.1.1 a B.1.3. Os valores dos coeficientes, obtidos para água, estão representados graficamente nas figuras 2.27, 2.28 e 2.29, em função da altura de líquido, para os vários caudais de borbulhamento, correspondendo cada gráfico a um valor distinto do diâmetro do orifício (0,2, 0,3 e 3,0 mm).

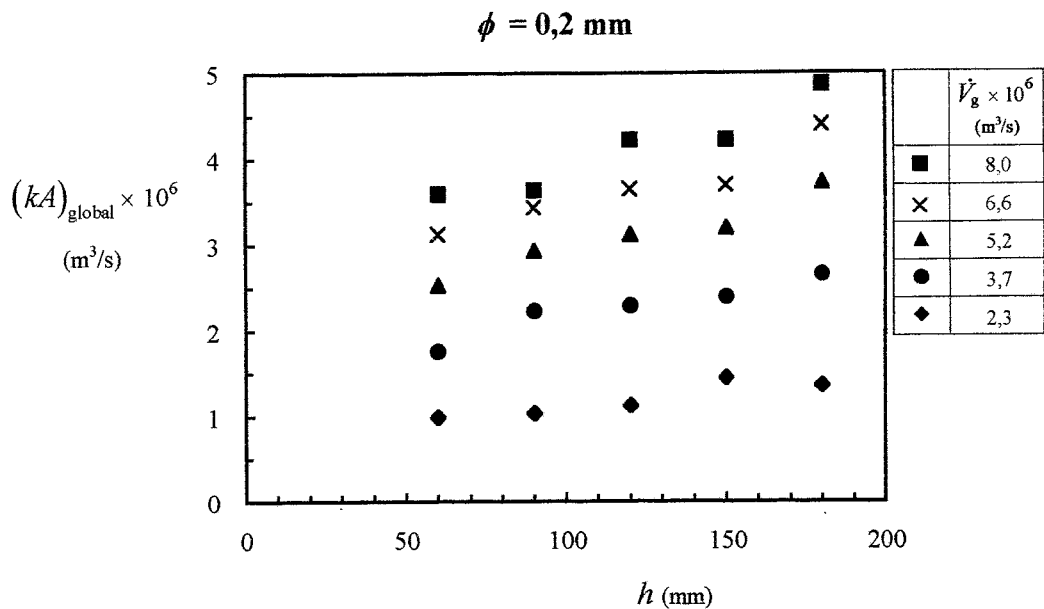


Figura 2.27 - Representação do coeficiente global de transferência de oxigênio, $(kA)_{\text{global}}$, em função da altura de líquido na coluna, h , para vários caudais de borbulhamento e para o orifício de 0,2 mm (água sem aditivos)

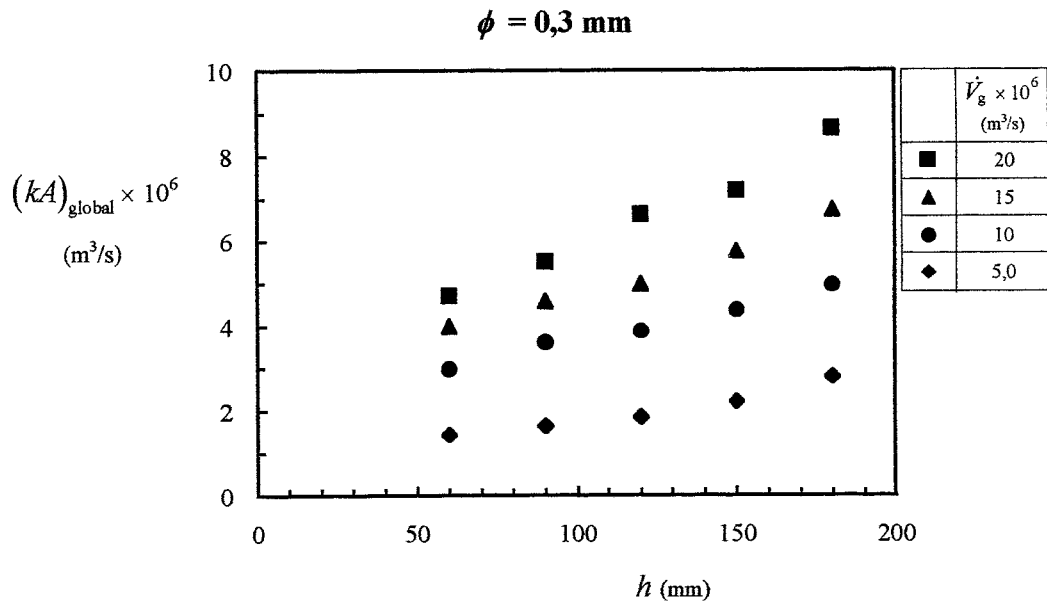


Figura 2.28 - Representação do coeficiente global de transferência de oxigênio, $(kA)_{\text{global}}$, em função da altura de líquido na coluna, h , para vários caudais de borbulhamento e para o orifício de 0,3 mm (água sem aditivos)

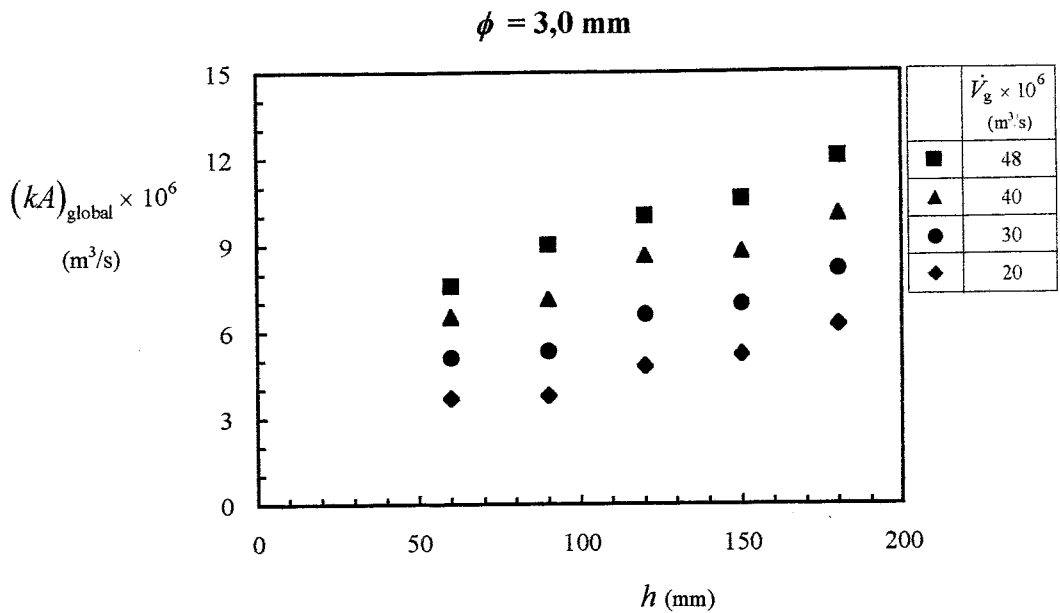


Figura 2.29 - Representação do coeficiente global de transferência de oxigénio, $(kA)_{\text{global}}$, em função da altura de líquido na coluna, h , para vários caudais de borbulhamento e para o orifício de 3,0 mm (água sem aditivos)

É evidente o aumento do coeficiente global de transferência, quer com o caudal de gás, quer com a altura de líquido no borbulhador, para qualquer um dos diâmetros do orifício de borbulhamento.

Se se compararem os resultados obtidos para diferentes diâmetros do orifício, com idênticos caudais de borbulhamento, conclui-se que os coeficientes globais relativos ao(s) orifício(s) mais pequeno(s) são sistematicamente superiores. Tome-se, por exemplo, um caudal de cerca de $5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, que foi utilizado com os orifícios de 0,2 e 0,3 mm. Para a gama completa de alturas de líquido considerada, os coeficientes globais variam entre $2,4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ e $3,6 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, para o orifício de 0,2 mm, enquanto que para o orifício de 0,3 mm se encontram valores entre $1,4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ e $2,9 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$. A um caudal de $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, que foi usado com os orifícios de 0,3 e 3,0 mm, encontram-se coeficientes globais entre $4,7 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ e $8,7 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ para o orifício de 0,3 mm de diâmetro, situando-se os valores correspondentes ao orifício de 3,0 mm entre $3,7 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ e $6,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

As diferenças observadas devem-se certamente ao facto de que, ao injectar o mesmo caudal de gás através de dois orifícios de diâmetros substancialmente diferentes, as bolhas formadas no orifício de menor diâmetro são mais pequenas, resultando numa maior área interfacial. Comparando as fotografias das figuras 2.15 ($\phi = 0,2$ mm, $\dot{V}_g = 8 \times 10^{-6}$ m³/s) e 2.19 ($\phi = 0,3$ mm, $\dot{V}_g = 8 \times 10^{-6}$ m³/s), ou ainda as que se apresentam nas figuras 2.21 ($\phi = 0,3$ mm, $\dot{V}_g = 20 \times 10^{-6}$ m³/s) e 2.23 ($\phi = 3,0$ mm, $\dot{V}_g = 20 \times 10^{-6}$ m³/s), vê-se que, em qualquer dos casos, o tamanho das bolhas formadas é nitidamente mais pequeno para o orifício de menor diâmetro. O número de bolhas existentes no líquido, em cada instante, é bastante mais elevado nesta situação, contribuindo também para isso o facto de as velocidades de subida serem inferiores, para bolhas com diâmetros mais pequenos.

ii) Coeficientes de transferência relativos à formação, subida e retenção de bolhas junto à superfície

A partir dos resultados das experiências do tipo B (representados nas tabelas B.1.7 a B.1.9) e dos valores dos coeficientes globais de transferência (ensaios tipo A), relativos às mesmas condições experimentais, podem determinar-se os vários valores dos coeficientes de transferência relativos à superfície livre do líquido, utilizando a equação (2.11). Pode então representar-se $\left[(kA)_f + (ka^*)_s h + (kA)_r \right] = (kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}$, em função de h , para cada valor do caudal de gás. Os gráficos correspondentes apresentam-se nas figuras 2.30 a 2.32, dizendo cada um deles respeito a um diâmetro do orifício de borbulhamento. Como atrás se disse, à luz do modelo adoptado, o declive das rectas resultantes é $(ka^*)_s$, enquanto a ordenada na origem é $\left[(kA)_f + (kA)_r \right]$. Os valores destes parâmetros, obtidos por ajustes lineares dos pontos experimentais, são indicados na tabela 2.2.

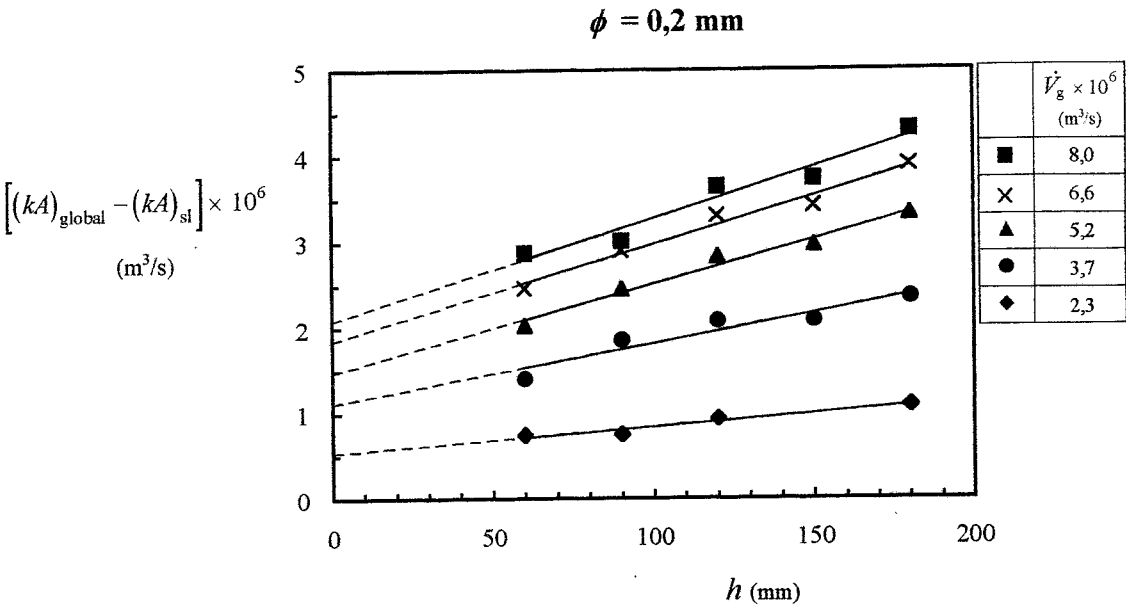


Figura 2.30 - Representação de $\left[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}} \right]$ em função da altura de líquido no borbulhador, h , para vários caudais de gás e para o orifício de 0,2 mm (água sem aditivos)

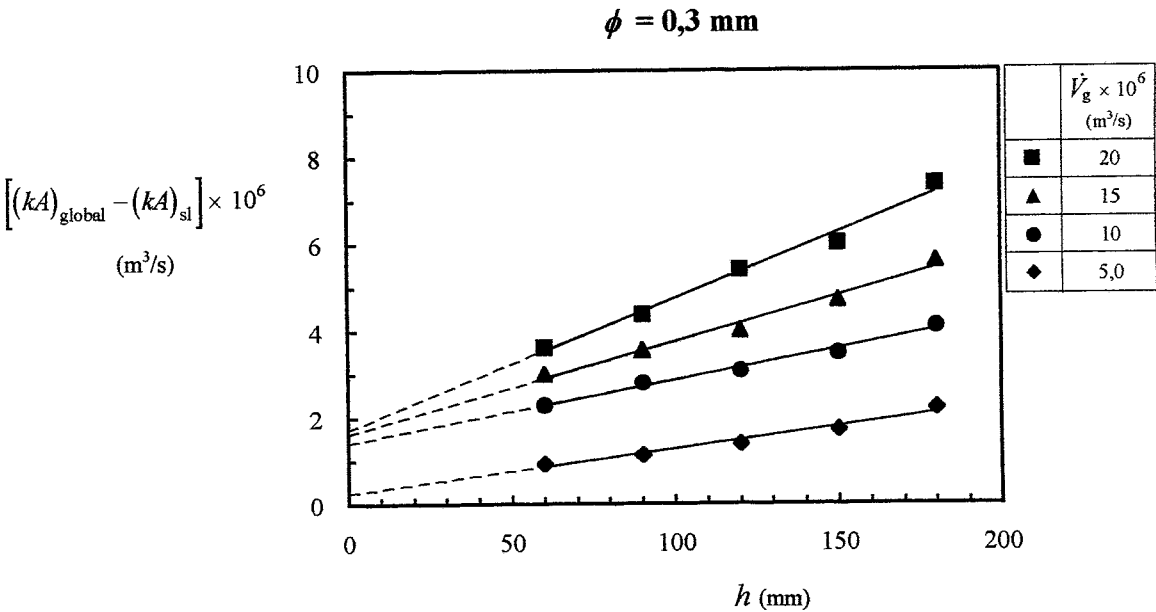


Figura 2.31 - Representação de $\left[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}} \right]$ em função da altura de líquido no borbulhador, h , para vários caudais de gás e para o orifício de 0,3 mm (água sem aditivos)

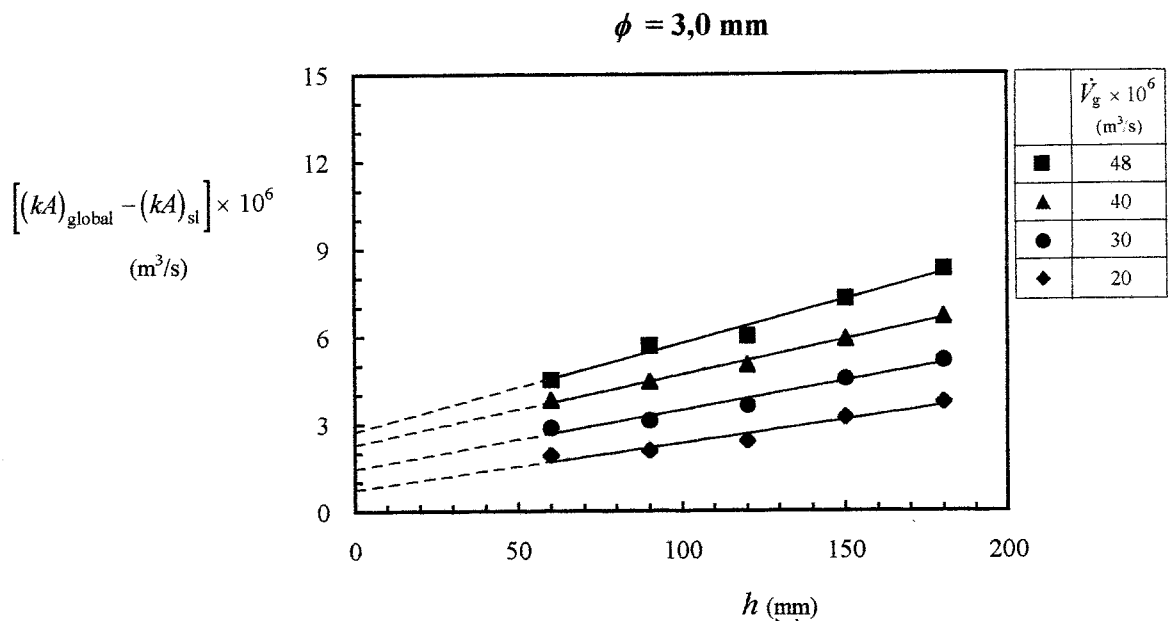


Figura 2.32 - Representação de $\left[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}\right]$ em função da altura de líquido no borbulhador, h , para vários caudais de gás e para o orifício de 3,0 mm (água sem aditivos)

Tabela 2.2 - Valores de $(k\alpha^*)_s$ (declive) e de $\left[(kA)_f + (kA)_r\right]$ (ordenada na origem) obtidos pelos ajustes lineares dos pontos experimentais representados nos gráficos das figuras 2.30, 2.31 e 2.32 (água sem aditivos)

ϕ	$\dot{V}_g \times 10^6$	$(k\alpha^*)_s \times 10^4$	$\left[(kA)_f + (kA)_r\right] \times 10^6$
(mm)	(m ³ /s)	(m ² /s)	(m ³ /s)
0,2	2,3	0,041	0,364
	3,7	0,085	0,869
	5,2	0,124	1,129
	6,6	0,139	1,403
	8,0	0,145	1,611
0,3	5,0	0,105	0,216
	10	0,145	1,422
	15	0,213	1,626
	20	0,304	1,720
3,0	20	0,160	0,761
	30	0,202	1,449
	40	0,241	2,294
	48	0,307	2,696

iii) Coeficientes de transferência relativos à formação

Os resultados experimentais relativos aos ensaios tipo A, realizados com borbulhamento de ar em água à qual se adicionou anti-espuma (Fumexol - 0,02% v/v), e que se apresentam nas tabelas B.1.4 a B.1.6, permitiram determinar coeficientes globais de transferência de oxigénio do ar para a água, com anti-espuma, para as várias condições experimentais. A determinação dos coeficientes globais foi feita utilizando a equação (2.7) e os resultados obtidos apresentam-se igualmente nas tabelas B.1.4 a B.1.6.

Em conjunto com os resultados obtidos em ensaios do tipo B, que se apresentam nas tabelas B.1.10 a B.1.12, e a partir dos quais foram determinados os vários coeficientes de transferência relativos à superfície livre do líquido, na presença de anti-espuma, foi também possível representar $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h (figuras 2.33 a 2.35). Nesta situação, a ordenada na origem das rectas obtidas deve ser um valor muito próximo de $(kA)_f$, uma vez que a contribuição relativa às bolhas retidas junto à superfície livre é praticamente nula, tal como foi referido na secção 2.3.4.

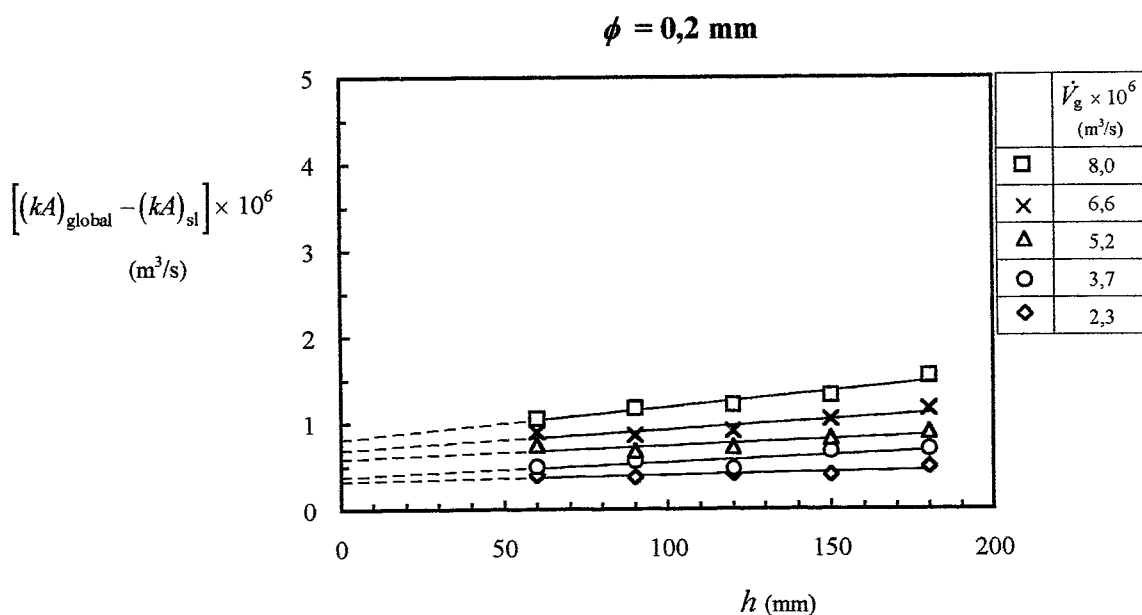


Figura 2.33 - Representação de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função da altura de líquido no borbulhador, h , para vários caudais de gás e para o orifício de 0,2 mm (água com Fumexol - 0,02% v/v)

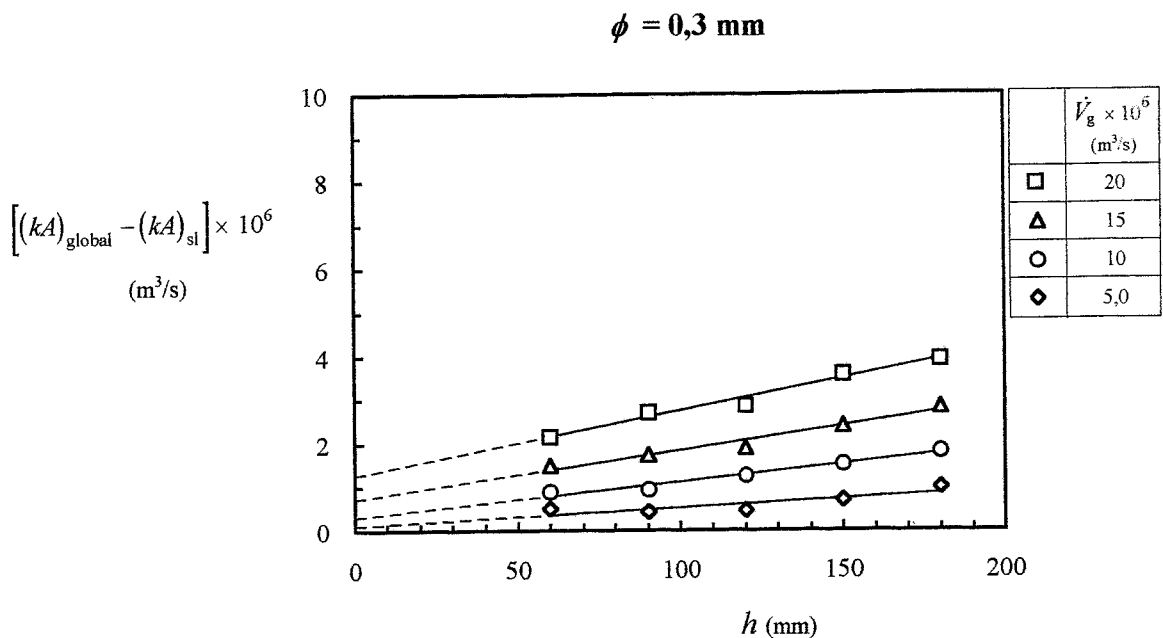


Figura 2.34 - Representação de $\left[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}} \right]$ em função da altura de líquido no borbulhador, h , para vários caudais de gás e para o orifício de 0,3 mm (água com Fumexol - 0,02% v/v)

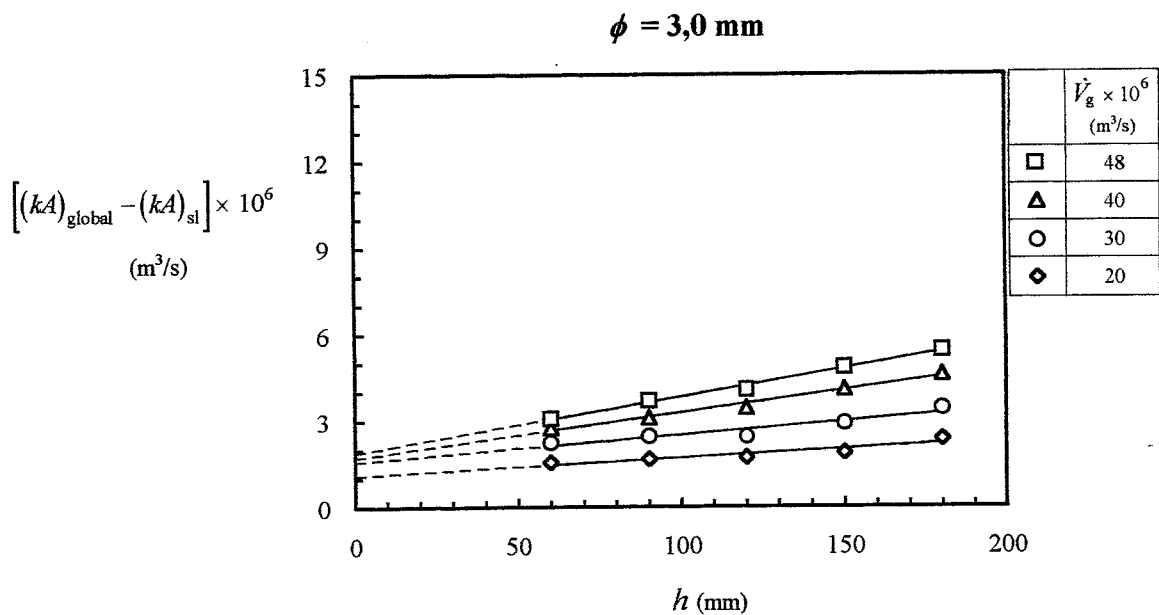


Figura 2.35 - Representação de $\left[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}} \right]$ em função da altura de líquido no borbulhador, h , para vários caudais de gás e para o orifício de 3,0 mm (água com Fumexol - 0,02% v/v)

Na tabela 2.3, apresentam-se os valores dos declives e das ordenadas na origem obtidos pelos ajustes lineares das várias rectas de ajuste de $\left[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}\right]$ em função de h representadas nas figuras 2.33 a 2.35.

Tabela 2.3 - Valores de $(ka^*)_s$ (declive) e de $(kA)_f$ (ordenada na origem) obtidos pelos ajustes lineares dos pontos experimentais representados nos gráficos das figuras 2.33, 2.34 e 2.35 (água com anti-espuma)

ϕ	$\dot{V}_g \times 10^6$	$(ka^*)_s \times 10^4$	$(kA)_f \times 10^6$
(mm)	(m ³ /s)	(m ² /s)	(m ³ /s)
0,2	2,3	0,007	0,330
	3,7	0,017	0,380
	5,2	0,015	0,597
	6,6	0,024	0,689
	8,0	0,037	0,812
0,3	5,0	0,041	0,127
	10	0,081	0,318
	15	0,111	0,744
	20	0,148	1,276
3,0	20	0,061	1,115
	30	0,094	1,572
	40	0,156	1,729
	48	0,196	1,890

Comparando as ordenadas na origem, correspondentes a ensaios com anti-espuma (tabela 2.3), com as obtidas a partir de ensaios em que se usou apenas água (tabela 2.2), vê-se que as primeiras são sempre inferiores às segundas, à excepção de dois casos (para o orifício de 3,0 mm). De acordo com a interpretação feita, este resultado deve-se ao facto de o

agente anti-espuma eliminar, quase na totalidade, a contribuição das bolhas retidas junto à superfície.

É sabido que a presença na água de compostos com propriedades tensio-activas pode afectar a transferência de massa entre as duas fases - líquido e gás. A influência destes compostos é justificada por estarem na origem de diferentes efeitos (Llorens *et al.*, 1988). São descritos efeitos hidrodinâmicos, causados pela diferença das tensões superficiais, e que se traduzem, por exemplo, na diminuição da turbulência interfacial (efeito sobre k). Refere-se também um efeito de “barreira”, devido à acumulação na interface de moléculas do composto tensio-activo. Esta camada oferece um obstáculo adicional ao movimento das moléculas de gás, que pode mesmo imobilizar a interface, e diminuir a área disponível para transferência entre as bolhas e o líquido. No entanto, quando a turbulência interfacial é muito elevada e/ou a renovação da interface é muito rápida, o que acontece, por exemplo, durante a formação de uma bolha, as moléculas do composto tensio-activo dispõem de pouco tempo para serem adsorvidas à superfície da bolha e, nessas condições, a presença de um agente tensio-activo não deverá afectar substancialmente o fenómeno de transferência de massa.

É assim razoável pensar que as diferenças nas taxas de transferência decorrentes da adição de anti-espuma sejam devidas sobretudo à alteração introduzida no tamanho das bolhas e ao facto de estas deixarem de ser retidas sob a superfície livre. A ordenada na origem corresponderá à transferência na formação, apenas, nos ensaios em que a água contém anti-espuma. Para a subida, a introdução de anti-espuma acarreta alterações ao coeficiente de transferência, porque modifica drasticamente a morfologia do borbulhamento.

Antes de proceder a uma análise mais detalhada dos resultados, em função dos vários parâmetros, é importante comparar os valores dos coeficientes de transferência de massa obtidos experimentalmente com valores previstos por correlações empíricas e algumas teorias. Essa comparação irá ser feita na secção seguinte. Poderá assim avaliar-se se o modelo desenvolvido é ou não adequado para descrever o processo global de transferência.

2.5 COMPARAÇÃO DOS COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA DETERMINADOS EXPERIMENTALMENTE COM VALORES PREVISTOS

2.5.1 Considerações gerais

Existem correlações empíricas e teorias, baseadas em modelos particulares, que permitem prever valores para os coeficientes de transferência locais associados à formação de bolhas em orifícios, $(kA)_f$, ou relativos à subida de bolhas numa coluna de líquido, $(ka^*)_s$.

Em praticamente todas as correlações, são utilizados parâmetros que caracterizam a bolha, nomeadamente o diâmetro equivalente, a área superficial da bolha em ascensão, ou o volume da bolha no momento de desprendimento do orifício.

No caso de $(ka^*)_s$, por exemplo, a área interfacial por unidade de altura, a^* , está directamente relacionada com a forma e tamanho das bolhas em ascensão. Dada a diversidade de diâmetros de orifícios e de caudais de gás utilizados nas experiências, vão encontrar-se bolhas de tamanhos e formas muito diferentes. Isso é visível nas fotografias das figuras 2.13 a 2.26. Quanto à forma, pode dizer-se que para o orifício mais pequeno (0,2 mm) e para qualquer valor adoptado do caudal de gás, as bolhas em ascensão no líquido são elipsoidais (figuras 2.13 e 2.15), observando-se esferóides quase perfeitos para os valores mais baixos do caudal de borbulhamento (figura 2.13). Com o aumento do caudal de gás, as bolhas elipsoidais tornam-se mais irregulares e assimétricas. Para os caudais de borbulhamento utilizados com o orifício de 0,3 mm também se observam, na generalidade, bolhas com a forma elipsoidal (figuras 2.17, 2.19 e 2.21). Quando se utiliza o orifício de 3,0 mm, e para a gama de caudais de borbulhamento utilizada, as bolhas, de maior tamanho, passam a apresentar a forma de calotes esféricas.

Para efeitos da previsão da área interfacial por unidade de altura e dos coeficientes de transferência de massa relativos às bolhas em ascensão no líquido, as bolhas elipsoidais foram tomadas como esferóides (na maioria “achatados”). As definições da área superficial, volume

e diâmetro equivalente de esferóides e calotes esféricas são apresentadas em Apêndice (Apêndice C.1).

2.5.2 Coeficiente de transferência de massa relativo à subida das bolhas

Para se prever o valor do coeficiente de transferência de massa relativo à subida das bolhas, $(ka^*)_s$, teoricamente, vão-se considerar separadamente os parâmetros a_s^* e k_s .

i) Área interfacial por unidade de altura, a_s^*

Considere-se que está a borbulhar gás, através de um orifício, a caudal constante, $\dot{V}_g$, numa coluna de líquido de altura h . Supondo que todas as bolhas se formam com volume idêntico, V_b , a uma frequência constante, $\dot{V}_g/V_b$, e com uma velocidade de subida no líquido, v_b , também constante, cada bolha demora um tempo - h/v_b - a percorrer a coluna de líquido. Em regime permanente, em qualquer instante, o número total de bolhas, N_b , em ascensão no seio do líquido será então dado por

$$N_b = \frac{h\dot{V}_g}{v_b V_b} \quad (2.12)$$

que é o número de bolhas formadas no orifício, durante o tempo que uma bolha demora a ir da base ao topo da coluna.

Sendo A_b a área superficial de cada bolha, a área interfacial total por unidade de altura, na região de subida das bolhas, será $a_s^* = N_b A_b / h$, ou seja

$$a_s^* = \frac{A_b \dot{V}_g}{v_b V_b} \quad (2.13)$$

Para cada valor de $\dot{V}_g$ é necessário conhecer A_b , V_b e v_b para determinar a_s^* . Frequentemente, em vez de a_s^* , utiliza-se a área *equivalente* por unidade de altura de líquido, a_{es}^* , que se define em termos da *esfera* com volume igual ao da bolha, e que, nas condições em que foi deduzida a equação (2.13), se pode calcular como

$$a_{es}^* = \frac{6\pi d_e^2 \dot{V}_g}{v_b \pi d_e^3} = \frac{6\dot{V}_g}{v_b d_e} \quad (2.14)$$

Perante a diversidade de formas das bolhas durante a subida no líquido, pensou-se ser mais correcto, em primeira aproximação, medir dimensões médias das bolhas, a partir das fotografias (figuras 2.13 a 2.26), calculando A_b e V_b com base nesses valores. Para cada imagem (relativa a determinadas condições experimentais), foram medidas as dimensões do maior número possível de bolhas, calculando a partir daí, valores médios. As bolhas de forma elipsoidal foram tomadas normalmente como esferóides achatados, calculando-se A_b e V_b , para cada bolha, em função dos dois diâmetros medidos nas imagens fotográficas (ampliadas). O diâmetro equivalente médio, para um dado orifício e caudal de borbulhamento, foi considerado como sendo a média dos vários valores de d_e , obtidos como $d_e = (6V_b/\pi)^{1/3}$, para todas as bolhas. As bolhas tipo calote esférica foram caracterizadas, medindo-se, na fotografia, a altura da bolha e o diâmetro máximo (da base).

A velocidade de subida, v_b , varia com a forma e o tamanho das bolhas, sendo normalmente relacionada com o seu diâmetro equivalente, d_e .

Churchill (1988) apresenta valores da velocidade de bolhas de ar em água destilada e em água da torneira, medidos experimentalmente (Haberman e Morton, 1956), para uma extensa gama de tamanhos de bolhas ($0,4 \text{ mm} < d_e < 25 \text{ mm}$). Para bolhas (elipsoidais) com $0,7 \text{ mm} < d_e < 6 \text{ mm}$, os dois valores da velocidade diferem consideravelmente, pelo que se tomaram, neste trabalho, para as bolhas compreendidas nessa gama, os valores de v_b obtidos para água da torneira (Churchill, 1988, p. 413). Para bolhas de maior tamanho, que assumem a forma de calotes esféricas, a velocidade de subida torna-se independente do grau de

“contaminação” da água. Sendo o número de Reynolds, relativo ao movimento das bolhas no líquido, definido como

$$Re = \rho v_b d_e / \mu \quad (2.15)$$

em que ρ e μ representam, respectivamente, a massa volúmica e a viscosidade do líquido, verifica-se que, para $Re > 150$, a velocidade das bolhas (com a forma de calotes esféricas) é dada por

$$v_b = 0,711 \sqrt{g d_e \Delta \rho / \rho} \quad (2.16)$$

em que $\Delta \rho$ representa a diferença entre as massas volúmicas do líquido e do gás.

A dedução da equação (2.13) mostrou-se adequada para prever o valor de a_s^* , no caso do orifício de 3,0 mm. Para os outros orifícios, no entanto, verificou-se que o número de bolhas, N_b , calculado pela equação (2.12) podia diferir substancialmente do número real de bolhas observado nas imagens fotográficas correspondentes. Para os orifícios mais pequenos, as hipóteses que conduzem ao cálculo de N_b , pela equação (2.12), e, posteriormente, de a_s^* (eq. (2.13)), dificilmente se verificam. A formação (para um dado caudal de borbulhamento) de um maior número de bolhas, de menor tamanho, quando a injeção do gás é feita por orifícios mais pequenos, conduz a uma população mais “indisciplinada” de bolhas, cujo número, distribuição de tamanhos e velocidade de subida podem variar significativamente, ao longo da coluna, devido à frequência de fenómenos de coalescência e/ou quebra. Por este motivo, optou-se por estimar a área interfacial por unidade de altura de líquido a partir das imagens fotográficas correspondentes (figuras 2.13, 2.15, 2.17, 2.19 e 2.21). Para cada uma das imagens, delimitou-se uma zona intermédia da coluna de líquido (suficientemente acima da zona de injeção do gás e abaixo da superfície livre do líquido) e, para essa altura de líquido, calculou-se, para todas as bolhas aí “contidas”, a área superficial, A_b (de um esferóide), ou a área *equivalente* (πd_e^2). O valor de a_s^* (ou a_{es}^*) obteve-se finalmente dividindo a área superficial (ou *equivalente*) total pela altura de líquido considerada.

ii) Coeficiente de transferência de massa, k_s

Considerar-se-ão aqui separadamente os casos de $d_e \leq 15$ mm e $d_e > 15$ mm, já que é normalmente a partir de $d_e = 15$ mm, que as bolhas de ar, em água, tomam a forma de calotes esféricas (Clift *et al.*, 1978, p. 169).

- $d_e \leq 15$ mm

Há alguns estudos de transferência de massa feitos com bolhas de ar em água, para uma gama bastante larga de diâmetros equivalentes e diferentes estados de “contaminação” da água, devida, por exemplo, à presença de agentes tensio-ativos ou partículas em suspensão. Para as bolhas de menor tamanho ($d_e \leq 5$ mm) a “pureza” do sistema é determinante no processo de transferência de massa. Quanto mais pura estiver a água, mais elevadas são as taxas de transferência. Em água pura, previamente desgaseificada, os coeficientes de transferência encontrados experimentalmente são bem previstos pela correlação (Clift *et al.*, 1978, p. 196)

$$k_s = \left(0,14 \times 10^{-6} d_e^{-3} + 2,20 d_e^{-1/4} \right) D^{1/2} \quad (2.17)$$

em que D representa a difusividade, no líquido, do soluto que está a ser transferido. Esta equação pressupõe a utilização da área interfacial *equivalente* por unidade de altura (a_{es}^*), para obtenção do produto $(ka^*)_s$.

O valor de k_s determinado pela equação (2.17) representa o limite superior que se pode esperar num sistema idêntico (ar-água), em que a água não seja necessariamente “pura” e não tenha sido desgaseificada. A presença de solutos gasosos no líquido dificulta a transferência entre as duas fases.

Considerando agora sistemas “contaminados”, pela presença, mesmo que sob a forma de vestígios, de partículas em suspensão ou de algum composto tensio-ativo, há outras correlações que prevêm melhor os correspondentes coeficientes de transferência. A água da

torneira, utilizada no presente trabalho, inclui-se neste tipo de sistemas. Admitindo escoamento potencial em torno de um esferóide, Calderbank e Lochiel (1964) obtiveram

$$\text{Sh} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \text{Pe}^{1/2} \left[\frac{2e^3}{3E(\text{sen}^{-1}e - eE)} \right]^{1/2} \quad (2.18)$$

em que E representa o coeficiente de excentricidade (diâmetro vertical / diâmetro horizontal) e

$$e = (1 - E^2)^{1/2} \quad (2.19)$$

Os números de Sherwood, Sh , e de Peclet, Pe , definem-se como

$$\text{Sh} = \frac{k d_e}{D} \quad (2.20)$$

e

$$\text{Pe} = \frac{d_e v_b}{D} \quad (2.21)$$

A forma da equação (2.18) também implica que, para se obter o produto $(ka^*)_s$, se multiplique o valor de k_s (dado pela equação (2.18)) pela área *equivalente* por unidade de altura, a_{es}^* .

Beg (1975) (em Clift *et al.*, 1978, p. 152) apresenta uma correlação válida para esferóides rígidos, em condições de maior “contaminação” da água,

$$\text{Sh}' = 0,62(\text{Re}')^{1/2} \text{Sc}^{1/3} \quad (200 < \text{Re}' \leq 2000) \quad (2.22)$$

que poderá ser vista como um limite inferior para o sistema em estudo, já que a água da torneira não contém quantidades significativas de agentes (partículas em suspensão,

compostos tensio-activos) que, neste contexto, possam ser considerados contaminantes. Os números de Reynolds, Re' , e de Sherwood, Sh' , são definidos pelas equações (2.15) e (2.20), utilizando como dimensão característica

$$L = \frac{\text{área superficial da bolha}}{\text{perímetro máximo projectado num plano normal ao fluxo}}$$

O número de Schmidt, Sc , é, por sua vez,

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D} \quad (2.23)$$

Os valores experimentais de $(ka^*)_s$, relativos a caudais de borbulhamento iguais ou inferiores a $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ($\phi = 0,2$ e $0,3 \text{ mm}$), em água sem anti-espuma, irão ser comparados, na secção 2.5.4, com os três valores de $(ka^*)_s$ resultantes do produto de a_{cs}^* (ou a_s^*) por k_s , obtido a partir das equações (2.17), (2.18) ou (2.22). Na equação (2.18), o coeficiente de excentricidade, E , foi tomado, para cada valor do diâmetro do orifício e do caudal de borbulhamento, como a média dos valores de E obtidos a partir das dimensões medidas nas fotografias. Convém ainda referir que a gama de aplicabilidade da equação (2.22) foi verificada, para todos os casos em que a equação foi adoptada para prever o valor de $(ka^*)_s$.

- $d_e > 15 \text{ mm}$

Neste grupo, encontram-se já bolhas com a forma de calotes esféricas. Baird e Davidson (1962) desenvolveram uma teoria, aplicável a bolhas isoladas ($8 \text{ mm} \leq d_e \leq 42 \text{ mm}$), concluindo que o coeficiente de transferência, k_s , relativo à parte superior (esférica) das calotes, pode ser determinado como

$$k_s = 1,725 d_e^{-1/4} D^{1/2} \quad (2.24)$$

Incluindo também a transferência de massa através da base “plana” da bolha, Weber (1975) (em Clift *et al.*, 1978, p. 214) obteve a seguinte expressão, para $Re > 150$,

$$k_s = 2,216 d_e^{-1.4} D^{1.2} \quad (2.25)$$

Os valores previstos de $(ka^*)_s$, resultantes do produto de k_s , obtido através da equação (2.25), pela área interfacial equivalente por unidade de altura, a_{es}^* , determinado através da equação (2.14), irão ser comparados, na secção 2.5.4, com os correspondentes valores experimentais relativos a caudais de borbulhamento iguais ou superiores a $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ($\phi = 3,0 \text{ mm}$), em água sem anti-espuma.

2.5.3 Coeficiente de transferência de massa relativo à formação das bolhas

i) Dimensões das bolhas na formação

Existem numerosos estudos (Davidson e Schöler, 1960, Mersmann, 1963, Scheele e Meister, 1968, Ruff, 1972, Ruff, 1974, Ruff *et al.*, 1978, Rübiger e Vogelpohl, 1982, Rübiger e Vogelpohl, 1983, Miyahara *et al.*, 1983, Klug e Vogelpohl, 1986, Gaddis e Vogelpohl, 1986, Pamperin e Rath, 1995, etc) sobre a formação de bolhas (ou gotas) em orifícios e, em particular, sobre a formação de bolhas em líquidos pouco viscosos, a caudal constante (condições verificadas no presente trabalho). A formação de bolhas em orifícios é um fenómeno bastante complexo. Variáveis como o caudal de borbulhamento, o diâmetro do orifício, propriedades dos fluídos (massas volúmicas, viscosidade do líquido, tensão superficial) e outras características do sistema de borbulhamento determinam o mecanismo de formação das bolhas. Os modelos desenvolvidos na maior parte dos estudos estão por isso associados a condições algo restritas.

É comum distinguir dois tipos de borbulhamento, directamente relacionados com a velocidade do gás no orifício, u_o , e portanto associados a diferentes gamas do número de Weber, We , para o gás, definido como

$$We = \frac{\rho_g u_o^2 \phi}{\sigma} \quad (2.26)$$

em que ρ_g representa a massa volúmica do gás e σ a tensão superficial do sistema gás-líquido. Para baixas velocidades do gás através do orifício ($We < 1$), verifica-se que as bolhas se formam uma a uma, a uma frequência constante, e com dimensões idênticas (aproximadamente esféricas). Passando por uma fase de transição, aquele regime de borbulhamento modifica-se, habitualmente, para valores do número de Weber entre 1 e 4 (Gaddis e Vogelpohl, 1986). Alguns autores referem, a partir dessa altura, a formação de um “jacto” de gás, no orifício, que, a uma certa distância deste, se desintegraria em várias bolhas, de menor tamanho. Imagens cinematográficas (de alta velocidade) permitiram verificar, mais recentemente (Räbiger e Vogelpohl, 1983, Pamperin e Rath, 1995) que o “jacto” é, de facto, constituído por uma série de bolhas, muito próximas entre si, de formas algo irregulares, sendo a formação de algumas afectada significativamente pela proximidade das outras.

Räbiger e Vogelpohl (1983) descrevem, para estas condições, a formação de tipos diferentes de bolhas. Tendo como suporte numerosas observações experimentais, aqueles autores desenvolvem um modelo físico com base na sequência esquematizada na figura 2.36, que verificaram ser válido para orifícios de diâmetro entre 0,67 mm e 3,7 mm e para toda a gama de caudais.

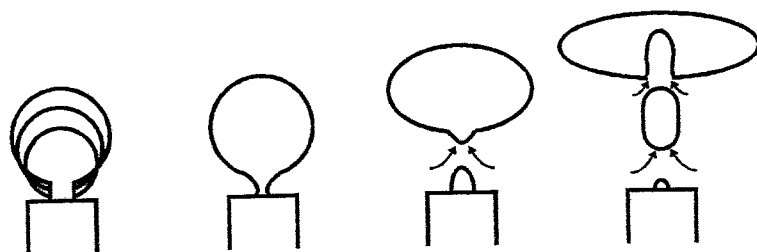


Figura 2.36 - Sequência proposta por Räbiger e Vogelpohl (1983) para a formação de bolhas em orifícios

Após o desprendimento de uma dada bolha (bolha “primária”), do orifício (3ª etapa esquematizada na figura 2.36), o “pescoço” da bolha desloca-se no sentido ascendente, sendo este filamento de gás “empurrado” ainda mais para o interior da bolha, pelo movimento induzido do líquido, nesse sentido. O decréscimo correspondente de pressão ao nível do orifício faz com que uma nova bolha, de menor tamanho, seja rapidamente “aspirada”. Acima de um determinado valor do caudal de borbulhamento, o movimento ascendente do líquido no interior da (primeira) bolha “primária” pode resultar na desintegração desta bolha em duas bolhas idênticas, ditas “secundárias”.

A turbulência inerente a este regime de borbulhamento é igualmente responsável pela maior probabilidade de coalescência entre bolhas próximas e oscilações na forma das bolhas, acima do orifício. Por estes motivos, nem sempre será válido admitir que o volume das bolhas na formação é igual ao respectivo volume ao longo da coluna. Não será razoável, portanto, considerar os valores dos volumes das bolhas (em ascensão no líquido) medidos através das fotografias das figuras 2.13 a 2.26, como os volumes das bolhas na zona de formação, para os vários orifícios e para todas as gamas de caudais adoptadas no presente trabalho.

Na ausência de imagens cinematográficas de alta velocidade, que permitiriam medir o volume das bolhas, na formação, para as várias condições experimentais adoptadas nos ensaios de transferência de massa, houve necessidade de recorrer a um modelo que pudesse prever o tamanho das bolhas formadas nos três orifícios, para as gamas de caudais de borbulhamento adoptadas. O valor assim encontrado seria utilizado nas correlações que prevêem o valor de $(kA)_f$ e que serão apresentadas na secção seguinte. O modelo físico desenvolvido por Rübiger e Vogelpohl (1983) parte do balanço entre as forças de impulsão, arrasto e tensão superficial, aplicadas a uma bolha em formação, num orifício.

Considerando ainda a força de inércia e a quantidade de movimento, que se torna importante para orifícios muito pequenos, aplicou-se, neste trabalho, a equação resultante do balanço de todas as forças (e quantidade de movimento) às várias condições experimentais, calculando, para cada diâmetro do orifício e para cada caudal de borbulhamento, o volume da bolha no momento do desprendimento. A definição dos vários termos da equação de balanço de forças utilizada encontra-se descrita em Apêndice (Apêndice A.3). Os valores assim obtidos para o diâmetro das bolhas são apresentados na secção 2.5.4 (tabela 2.6).

ii) Coeficiente de transferência de massa, $(kA)_f$

Considerando que, na formação, as bolhas crescem, mantendo uma forma esférica, até se desprenderem, e que a resistência à difusão se localiza num filme de líquido, adjacente à superfície da bolha, de espessura muito reduzida, comparativamente ao tamanho da bolha, Sherwood *et al.* (1975), com base numa análise feita por Levich (1962), desenvolveram um modelo teórico de que resulta

$$(kA)_f = 3,572 \dot{V}_g^{2/3} D^{1/2} t_f^{1/6} \quad (2.27)$$

em que $t_f (= \pi d_f^3 / 6 \dot{V}_g)$ representa o tempo de formação da bolha, com um diâmetro final d_f . Substituindo t_f , a equação (2.27) fica

$$(kA)_f = 3,207 \dot{V}_g^{1/2} D^{1/2} d_f^{1/2} \quad (2.27.a)$$

Calderbank e Patra (1966) obtiveram uma equação idêntica,

$$(kA)_f = 3,821 \dot{V}_g^{1/2} D^{1/2} d_f^{1/2} \quad (2.28)$$

partindo de uma teoria simples que pressupõe que a superfície da bolha em expansão é constituída por elementos de fluido de diferentes “idades” (Beek e Kramers, 1962) e que considera ainda a solução da equação de difusão num meio semi-infinito, válida para tempos de contacto curtos.

Uma outra expressão, desenvolvida por Zheleznyak (1967), para formação “rápida” de gotas (ou bolhas) esféricas em orifícios, inclui a dependência directa do diâmetro do orifício, ϕ ,

$$(kA)_f = \frac{4 A_f}{\phi} \sqrt{\frac{D}{3}} \left(\frac{\dot{V}_g}{36 \pi \sqrt{t_f}} \right)^{1.3} \quad (2.29)$$

sendo A_f a área superficial da partícula fluída no momento do desprendimento (Clift *et al.*, 1978, p. 336). A formação “rápida” caracteriza-se pela circulação de fluído no interior da gota ou bolha, induzida pela quantidade de movimento do fluído. Esta condição (Clift *et al.*, 1978, p. 336) foi verificada para todos os orifícios e caudais de borbulhamento utilizados no presente trabalho. A equação (2.29) foi obtida para os casos em que a resistência externa à transferência de massa é predominante, considerando que a formação ocorre a caudal constante, e desprezando a área superficial da bolha (ou gota) residual que fica no orifício após o desprendimento. Segundo Clift *et al.* (1978), a equação (2.29) prevê correctamente o efeito do diâmetro do orifício e do caudal de gás. Reescrevendo a equação (2.29) em termos do diâmetro final da bolha, d_f , vem

$$(kA)_f = 1,671 \frac{\dot{V}_g^{1/2} D^{1/2} d_f^{3/2}}{\phi} \quad (2.29.a)$$

Os valores de $(kA)_f$, obtidos experimentalmente através dos ensaios realizados em água com anti-espuma, irão ser comparados, na secção seguinte, com os resultados previstos pelas equações (2.27) e (2.29).

2.5.4 Resultados das várias correlações. Comparação com os valores obtidos experimentalmente

i) Coeficiente de transferência de massa relativo à subida das bolhas, (ka^*) ,

Na tabela 2.4 apresentam-se os valores de a_s^* e a_{cs}^* , para os vários diâmetros do orifício e caudais de gás, determinados como a área interfacial por unidade de altura *medida* através das fotografias (figuras 2.13, 2.15, 2.17, 2.19 e 2.21), para os orifícios mais pequenos ($\phi = 0,2$ e $0,3$ mm), ou calculados pela equação 2.13 (ou 2.14), para o orifício maior ($\phi = 3,0$ mm). Apresentam-se ainda os valores de alguns parâmetros utilizados no cálculo de k_s , e relacionados directamente com as dimensões das bolhas, tais como o diâmetro

equivalente (médio), d_e , o coeficiente de excentricidade, E , e a velocidade de subida das bolhas, v_b .

Tabela 2.4 - Valores médios das dimensões características das bolhas, velocidade de subida e áreas interfaciais por unidade de altura de líquido, a_s^* e a_{es}^* , para as várias condições experimentais (água sem aditivos)

ϕ (mm)	$\dot{V}_g \times 10^6$ (m ³ /s)	$d_e \times 10^3$ (m)	E	$v_b \times 10^2$ (m/s)	$a_s^* \times 10^2$ (m)	$a_{es}^* \times 10^2$ (m)
0,2	2,3	2,1	0,50	21	0,48	0,45
	8,0	2,0	0,57	21	2,07	1,95
0,3	5,0	2,7	0,54	23	1,47	1,41
	10 ⁽¹⁾	2,2	0,63	21	2,40	2,30
	20	1,9	0,74	20	2,50	2,36
3,0	20	18,3	-	30	1,79	2,18
	48 ⁽¹⁾	25,1	-	35	2,67	3,28

⁽¹⁾ - Para estes valores do caudal, não foram feitas fotografias; por essa razão, consideraram-se as dimensões das bolhas iguais às determinadas, a partir das fotografias, para valores próximos do caudal (8×10^{-6} e 50×10^{-6} m³/s)

Na tabela 2.5 comparam-se os valores de $(ka^*)_s$ experimentais com os previstos pelas várias correlações (produto dos valores de k_s previstos pelas equações (2.17), (2.18), (2.22) e (2.25), pelos correspondentes valores de a_{es}^* (ou a_s^*), apresentados na tabela 2.4).

Os valores apresentados na tabela 2.5 permitem fazer algumas observações. É significativa a diferença entre os valores previstos pelas equações (2.17) e (2.18) e os previstos pela equação (2.22), para os orifícios de 0,2 e 0,3 mm. Para caudais de borbulhamento inferiores a 20×10^{-6} m³/s, os valores experimentais de $(ka^*)_s$ aproximam-se muito dos previstos pela equação (2.18) (escoamento potencial).

Para $\dot{V}_g = 20 \times 10^{-6}$ m³/s ($\phi = 0,3$ mm), o valor experimental tende a aproximar-se do valor limite (para água pura e previamente desgaseificada) previsto pela equação (2.17). Pode

dizer-se que, de uma forma global, os valores de $(ka^*)_s$ obtidos experimentalmente com os orifícios de 0,2 e 0,3 mm são de ordem de grandeza idêntica à dos valores previstos pelas equações (2.17) e (2.18).

Tabela 2.5 - Comparação dos resultados experimentais de $(ka^*)_s$ com os correspondentes valores previstos (água sem aditivos)

ϕ (mm)	$\dot{V}_g \times 10^6$ (m ³ /s)	$(ka^*)_s \times 10^4$ (m ² /s)				
		experimental	previsto			
			eq. (2.17)	eq. (2.18)	eq. (2.22)	eq. (2.25)
0,2	2,3	0,041	0,057	0,030	0,007	-
	8,0	0,145	0,272	0,129	0,030	-
0,3	5,0	0,105	0,118	0,085	0,019	-
	10 ⁽¹⁾	0,145	0,268	0,141	0,033	-
	20	0,304	0,365	0,146	0,034	-
3,0	20	0,160	-	-	-	0,053
	48 ⁽¹⁾	0,307	-	-	-	0,074

(1) - Para estes valores do caudal, não foram feitas fotografias; por essa razão, consideraram-se as dimensões das bolhas iguais às determinadas, a partir das fotografias, para valores próximos do caudal (8×10^{-6} e 50×10^{-6} m³/s)

Analisando agora os valores correspondentes ao orifício de 3,0 mm, constata-se que os valores experimentais de $(ka^*)_s$ são muito superiores (até mais do que 4 vezes) aos valores “teóricos” previstos pela equação (2.25). O cálculo dos parâmetros d_e e a_{es}^* , utilizados na equação (2.25), baseou-se nas dimensões das bolhas maiores existentes na coluna (figuras 2.23 e 2.25). São visíveis, no entanto, bastantes bolhas muito mais pequenas, que tornam a_{es}^* efectivamente superior ao valor apresentado na tabela 2.4. Essa será uma das razões que pode justificar o afastamento entre os valores experimentais e os valores previstos. Este afastamento acentua-se com o aumento do caudal de gás, o que poderá estar relacionado com a maior turbulência do borbulhamento; esta turbulência promove a quebra e a

coalescência das bolhas maiores, de que resulta, por sua vez, a formação de um maior número de bolhas mais pequenas (ver figura 2.25).

ii) Coeficiente de transferência de massa relativo à formação das bolhas, $(kA)_f$

A utilização das equações (2.27) e (2.29) para prever os valores do coeficiente de transferência de massa na formação, $(kA)_f$, pressupõe o conhecimento do diâmetro da bolha (supostamente esférica), no momento de desprendimento do orifício. Tal como já foi referido anteriormente, os diâmetros das bolhas, na formação, vão aqui ser estimados a partir da equação (A.3.17), resultante de um balanço de forças aplicado à bolha. Os valores obtidos do diâmetro das bolhas, d_f , para os vários orifícios ($\phi = 0,2, 0,3$ e $3,0$ mm) e para os vários caudais de borbulhamento utilizados nos ensaios experimentais, realizados em água com anti-espuma, são apresentados na tabela 2.6. Na mesma tabela, apresentam-se os valores dos coeficientes de transferência relativos à formação das bolhas obtidos experimentalmente (ensaios com adição de anti-espuma à água) e os correspondentes valores previstos pelas equações (2.27) e (2.29).

Analisando os resultados da tabela 2.6, é possível retirar algumas conclusões. Os valores do número de Weber, para os dois orifícios mais pequenos, situam-se, mesmo para os caudais de borbulhamento mais baixos, bastante acima de 4, que se relembra ser o valor deste número adimensional a partir do qual o gás sai do orifício aparentemente sob a forma de um “jacto”. Já foi referido anteriormente que este “jacto” não é mais do que uma série de bolhas, muito próximas entre si, de tamanhos e formas mais irregulares, e com uma elevada quantidade de movimento, no orifício. É curioso notar que, para aqueles orifícios ($\phi = 0,2$ e $0,3$ mm), e para as gamas de caudais de borbulhamento consideradas, o modelo utilizado para estimar o diâmetro das bolhas na formação (Apêndice A.3, eq. (A.3.17)), prevê uma ligeira diminuição de d_f com o aumento do caudal. A quantidade de movimento torna-se mais importante do que as outras forças que retêm a bolha no orifício (inércia, arrasto, tensão superficial), “obrigando-a” a desprender-se do orifício muito mais rapidamente, e portanto, com um menor volume.

Tabela 2.6 - Comparação dos valores de $(kA)_f$ determinados experimentalmente, em água com anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v), com os previstos

ϕ (mm)	$\dot{V}_g \times 10^6$ (m ³ /s)	We ⁽¹⁾	$d_f^{(1)}$	$(kA)_f \times 10^6$		
			(mm)	(m ³ /s)		
			estimado (eq. (A.3.17))	experimental	previsto	
					eq. (2.27)	eq. (2.29)
0,2	2,3	31	2,5	0,330	0,012	0,080
	3,7	79	2,2	0,380	0,014	0,081
	5,2	156	2,0	0,597	0,016	0,087
	6,6	252	2,0	0,689	0,018	0,094
	8,0	370	1,9	0,812	0,020	0,100
0,3	5,0	43	3,8	0,127	0,022	0,143
	10	171	3,1	0,318	0,028	0,155
	15	386	3,0	0,744	0,034	0,174
	20	686	2,9	1,276	0,038	0,193
3,0	20	0,7	12,4	1,115	0,080	0,171
	30	1,5	13,8	1,572	0,103	0,248
	40	2,7	15,1	1,729	0,124	0,326
	48	4,0	16,0	1,890	0,140	0,389

⁽¹⁾ - estes parâmetros foram determinados considerando o valor medido, neste trabalho, da tensão superficial do sistema ar - água com Fumexol 0,02% v/v ($\sigma = 41 \times 10^{-3}$ N/m, a 25°C)

Para o orifício de 3,0 mm, a situação é algo diversa. O tamanho das bolhas aumenta com o caudal (evolução mais habitual) e o número de Weber é sempre inferior ou igual a 4. Tal como se pode comprovar pelas fotografias respectivas (figuras 2.23 a 2.26), para os caudais mais baixos as bolhas formam-se uma a uma, sem grande interacção entre elas, enquanto que para o caudal de 50×10^{-6} m³/s (figura 2.25) já é perfeitamente visível a interacção entre bolhas sucessivas, na vizinhança do orifício.

Atente-se agora nos valores previstos do coeficiente de transferência de massa, $(kA)_f$. É nítida a diferença entre os valores previstos pela equação (2.27) e pela equação (2.29). Para os orifícios mais pequenos (0,2 e 0,3 mm), os valores obtidos pela equação (2.29) são 5 a 6,5

vezes superiores aos obtidos pela equação (2.27), enquanto que para o orifício de 3,0 mm aquela razão é sempre inferior a 3. Lembra-se que a equação (2.29), proposta por Zheleznyak (1967), inclui a dependência do diâmetro do orifício, variando $(kA)_f$ na razão inversa de ϕ . Logo, para orifícios de diâmetro muito pequeno, o valor de $(kA)_f$ determinado por esta correlação é fortemente influenciado pelo valor de ϕ . Como se pode ver facilmente, fazendo o quociente entre os segundos membros das duas correlações,

$$\frac{1,671 \frac{\dot{V}_g^{1/2} D^{1/2} d_f^{3/2}}{\phi}}{3,207 \dot{V}_g^{1/2} D^{1/2} d_f^{1/2}} = 0,52 \frac{d_f}{\phi}$$

como a razão (d_f/ϕ) é mais elevada para os orifícios mais pequenos, o afastamento entre as duas correlações é superior.

Os resultados apresentados na tabela 2.6 mostram que os coeficientes de transferência determinados experimentalmente são, na sua quase totalidade, bastante superiores (até 8 vezes) aos valores previstos pela correlação de Zheleznyak (equação (2.29)). Se comparados com os resultados previstos por Levich e Sherwood (equação (2.27)), os valores obtidos experimentalmente são todos bastante mais elevados, chegando a ser 40 vezes superiores.

Sabe-se que a transferência de massa durante a formação de bolhas pode ser uma parcela muito significativa da taxa de transferência global, nomeadamente em processos de absorção, devido à contínua renovação da superfície da bolha, circulação intensa no seu interior e oscilações na forma. Já foi referido que o mecanismo de formação das bolhas é significativamente alterado para valores do número de Weber acima de 4. A elevada turbulência (do gás e do líquido) na vizinhança do orifício pode ser responsável por um aumento ainda mais significativo das taxas de transferência associadas à formação das bolhas, eventualmente não contabilizado pelas correlações propostas. No entanto, aquele efeito é consideravelmente menos importante para o orifício de 3,0 mm ($We \leq 4$) e os desvios entre os valores experimentais e os valores previstos de $(kA)_f$ são igualmente elevados.

Mesmo um hipotético erro de 50% na estimativa do diâmetro das bolhas não seria o suficiente para fazer duplicar os valores previstos pela correlação de Zheleznyak (eq. (2.29)),

que continuariam a afastar-se até mais do que 4 vezes dos valores experimentais. Esse mesmo erro apenas faria aumentar 1,2 vezes os valores calculados pela equação (2.27). Pode referir-se no entanto que, por exemplo no que diz respeito ao orifício de 3,0 mm, os valores de d_f apresentados são comparáveis, com diferenças inferiores a 7%, aos calculados por outros modelos (Davidson e Schüller, 1960).

Apesar de algumas das simplificações introduzidas na previsão dos valores poderem contribuir para uma estimativa, por defeito, dos coeficientes de transferência na formação, isso não será suficiente para desvios tão grandes como os verificados. Isto sugere que haja algumas “falhas” no modelo teórico apresentado para descrever o processo de transferência de massa, na coluna de borbulhamento.

2.6 INSUFICIÊNCIA DO MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA ADOPTADO. EVIDÊNCIAS PARA UM MODELO COMPLEMENTAR

A análise da secção anterior mostra que os coeficientes de transferência relativos à formação, determinados experimentalmente, são de tal modo superiores aos previstos pelas teorias existentes (Sherwood *et al.*, 1975, Zheleznyak, 1967), que deve haver um mecanismo de transferência de massa que está a ser mal quantificado, ou mesmo ignorado, no modelo teórico adoptado; esse modelo supõe a existência de quatro regiões - formação, subida, bolhas retidas junto à superfície e superfície livre do líquido.

Observações feitas durante as experiências e comprovadas por imagens fotográficas mostram que, em determinadas condições de borbulhamento, se formam na água bolhas muito pequenas (diâmetro inferior a 0,3 mm), em grande número, aparentemente com elevados tempos de residência. É possível que estas “microbolhas” sejam responsáveis por um contributo muito significativo para a transferência de massa e, no entanto, elas não foram consideradas no modelo de transferência anteriormente exposto. Nos dois capítulos seguintes é feita uma análise detalhada dessa possibilidade.

3 AS MICROBOLHAS EM PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA POR BORBULHAMENTO: EVIDÊNCIA EXPERIMENTAL E ALGUNS ASPECTOS TEÓRICOS

3.1 ORGANIZAÇÃO DO CAPÍTULO

Na secção 3.2 (*Introdução ao problema*) é feita uma abordagem muito simples do tema central do capítulo, com vista a transmitir a ideia essencial em estudo.

Na secção 3.3 (*Comprovação da existência de microbolhas em água, em condições de borbulhamento intenso*) é descrita a técnica utilizada neste trabalho para tornar visíveis as microbolhas.

Segue-se, na secção 3.4 (*Análise da evolução de uma microbolha de gás imersa num líquido*) a apresentação das equações que traduzem o processo de difusão de soluto através da superfície da bolha e na vizinhança desta. Esta secção é relativamente extensa e comporta, para além da formulação teórica do problema (secção 3.4.1), a aplicação da metodologia a dois casos concretos de relevância para a compreensão da experiência descrita na secção 3.3. São eles a *dissolução de uma microbolha de gás, puro, em água previamente saturada* (secção 3.4.2) e a *dissolução de uma microbolha de gás, com dois componentes, em água previamente saturada* (secção 3.4.3). O processo de expansão das microbolhas por diminuição da pressão e em consequência da difusão de soluto é então tratado na secção 3.4.4.

Algumas referências importantes de outros autores à existência de microbolhas são passadas em revista na secção 3.5, e na secção 3.6 é feita alguma discussão sobre mecanismos possíveis de formação de microbolhas e descritas experiências que procuram elucidar a importância relativa desses mecanismos no caso do presente trabalho.

3.2 INTRODUÇÃO AO PROBLEMA

A evidência experimental a favor da existência e importância das “microbolhas” no processo de absorção surgiu neste trabalho de forma algo fortuita. Na “literatura” de Engenharia Química relativa a transferência de massa em borbulhamentos, não foram inicialmente detectadas pelo autor desta tese quaisquer referências a este tipo de fenómeno.

Foi apenas durante alguns ensaios de borbulhamento com vista à obtenção de registos fotográficos que tal ideia veio a surgir. Em particular, no caso de borbulhamento de ar em água contendo anti-espuma, através dos orifícios mais pequenos (ver figura 2.22). Verificou-se nesses ensaios que, ao fim de algum tempo de borbulhamento contínuo, a água começava a apresentar um aspecto que se pode apelidar de “leitoso”; esse aspecto branco-translúcido da água traduzia uma emulsificação do ar, na forma de microbolhas, que não eram percebidas como tal quando em pequeno número.

A ser concebida a formação contínua deste tipo de bolhas nos borbulhamentos em água sem aditivos, talvez ficassem explicadas as elevadas taxas de transferência de massa para o líquido, já que praticamente todo o oxigénio nelas contido iria ser absorvido pelo líquido. De facto, como adiante se mostrará com mais detalhe, as bolhas de dimensão suficientemente reduzida entram em auto-colapso, dissolvendo-se totalmente no líquido que as envolve.

Para se poder desde já avaliar a particularidade e importância das microbolhas basta dar o seguinte exemplo: considere-se água em que se dissolveu oxigénio puro até a respectiva concentração no líquido, C , atingir a concentração de saturação, C^* , relativa a uma dada pressão (P_e) e temperatura. Nesta situação, sem alterar as condições de pressão e temperatura do sistema, dir-se-ia impossível transferir mais oxigénio para a água. De facto, se se “colocasse” nessa água uma bolha de oxigénio puro de alguns milímetros de diâmetro não haveria transferência de oxigénio da bolha para a água, já que líquido e gás se encontravam em equilíbrio. No entanto, se em vez dessa bolha, se “colocassem” na água algumas microbolhas de oxigénio, com diâmetro de 100 μm (ou menos), elas dissolver-se-iam, mesmo assim, cedendo todo o seu oxigénio à água. Explica-se seguidamente o porquê deste aparente “contra-senso”.

A pressão, P , no interior de uma bolha de diâmetro d é dada por

$$P = P_e + \frac{4\sigma}{d} \quad (3.1)$$

em que P_e representa a pressão exterior à bolha e $4\sigma/d$, o termo da pressão relativo à tensão superficial, σ . Para valores de d muito pequenos (microbolhas), o termo da tensão superficial faz aumentar significativamente a pressão no interior da bolha. Por exemplo, para uma bolha de diâmetro igual a 100 μm , em água a 20°C, $(4\sigma/d) = 2,9 \times 10^{-2}$ bar. A concentração de oxigénio que no líquido estaria em equilíbrio com a pressão no interior da bolha torna-se assim superior à concentração de oxigénio que está dissolvido na água “saturada”. Por isso, a microbolha é ainda “capaz” de transferir oxigénio para a água. Como, ao perder oxigénio, o seu tamanho diminui e, conseqüentemente, o termo relativo à tensão superficial aumenta, a pressão interna é cada vez maior, bem como a concentração, C^* , que, no líquido, estaria em equilíbrio com essa pressão. Desta forma, o processo de dissolução auto-sustenta-se, prosseguindo até ao colapso da microbolha, sendo todo o oxigénio da microbolha transferido para a água.

Como posteriormente se veio a constatar, através de uma segunda pesquisa bibliográfica, este fenómeno é relativamente bem conhecido dos especialistas em oceanografia (MacIntyre, 1972, Merlivat e Memery, 1983, Leighton, 1994). Houve, contudo, que o evidenciar, nas condições do presente trabalho, por um conjunto elaborado de experiências que a seguir são descritas.

3.3 COMPROVAÇÃO DA EXISTÊNCIA DE MICROBOLHAS EM ÁGUA, EM CONDIÇÕES DE BORBULHAMENTO INTENSO

As bolhas gasosas com diâmetro inferior a um dado valor (75 a 100 μm , consoante as condições de iluminação) não são detectáveis à vista desarmada. A sua detecção e caracterização em termos de tamanho, isoladamente ou em forma de “população”, pode ser

feita por técnicas ópticas sofisticadas (microscopia electrónica, dispersão de luz, holografia), ou técnicas acústicas. Todas estas técnicas têm vindo a progredir rapidamente, nos últimos anos, sendo no entanto, bastante específicas e nem sempre disponíveis.

No caso presente, e utilizando os meios existentes, pensou-se que uma forma simples de tornar visíveis as microbolhas, no sistema em estudo, seria provocando o aumento do seu volume, por diminuição da pressão. Para o efeito, utilizou-se uma instalação como a que se esquematiza na figura 3.1.

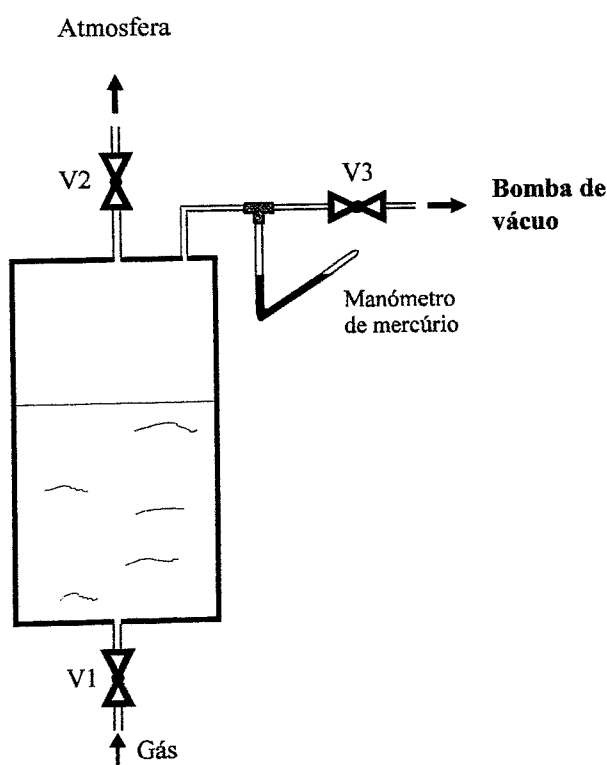


Figura 3.1 - Instalação utilizada para visualização de microbolhas formadas em condições de borbulhamento intenso

A coluna em acrílico (diâmetro interno de 100 mm), cuidadosamente limpa, foi cheia com água até uma altura de cerca de 180 mm. Através de um orifício central (diâmetro de 0,3

ou 3,0 mm), borbulhou-se ar a um caudal de $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, durante cerca de 20 minutos, com a coluna aberta para a atmosfera (válvula V2 aberta).

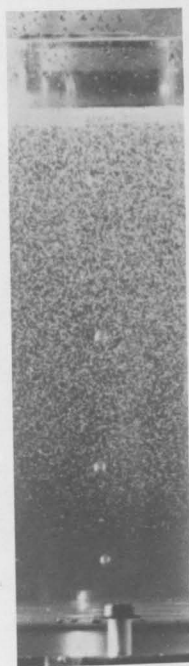
Decorrido esse período, o borbulhamento foi subitamente interrompido, fechando a válvula V1, e depois de deixar sair pela superfície livre do líquido as bolhas visíveis (o que apenas demorou escassos segundos), a válvula V2 foi fechada. Aplicou-se então rapidamente vácuo na coluna, com a válvula V3 aberta, até se atingir uma pressão mínima de cerca de $60 \times 10^{-3} \text{ bar}$ (45 mmHg). Note-se que este valor da pressão está suficientemente acima do valor da pressão de vapor da água que, à temperatura registada durante a experiência, 20°C , é de 18 mmHg (McCabe *et al.*, p. 1090). A possibilidade de ocorrer ebulição estava, assim, afastada. À medida que a pressão diminuía, desenvolveu-se repentinamente no seio da água, até então “límpida”, uma densa nuvem de bolhas muito pequenas, que se constatou que ascendia lentamente na direcção da superfície livre do líquido.

As fotografias apresentadas nas figuras 3.2 e 3.3 documentam esta sequência, que prova que as microbolhas existiam na água, mas eram invisíveis à pressão atmosférica (figura 3.2), tendo-se tornado visíveis quando expandidas a uma pressão suficientemente baixa (figura 3.3).

O borbulhamento intenso de ar, à pressão atmosférica, dissolveu no líquido oxigénio e azoto até concentrações que devem ser próximas das de saturação, a essa pressão. Quando a pressão diminui, o líquido passa a estar sobressaturado (em oxigénio e azoto), relativamente às pequenas bolhas de gás que aí se encontram. Por esse motivo, passa a ocorrer transferência dos solutos dissolvidos no líquido para as bolhas, fazendo-as aumentar *mais* de tamanho. Além disso, como a variação de pressão hidrostática ao longo da coluna ($\leq 18 \times 10^{-3} \text{ bar}$) se torna importante, relativamente à pressão à superfície do líquido, de $60 \times 10^{-3} \text{ bar}$, as bolhas sofrem uma expansão adicional, à medida que se aproximam da superfície livre do líquido. Pode então dizer-se que as bolhas “captadas” nas imagens da figura 3.3 [(a) e (b)] são já resultado desses vários efeitos, que serão analisados mais detalhadamente nas secções seguintes.



Figura 3.2 - Borbulhamento de ar em água, através de um orifício de 3,0 mm, à pressão atmosférica



(a)



(b)

Figura 3.3 - Aspecto da coluna representada na figura 3.2, posteriormente à interrupção do borbulhamento, (a) 22 segundos e (b) 28 segundos, após ter sido aplicado vácuo (60×10^{-3} bar)

A mesma experiência foi repetida, mas deixando passar alguns segundos entre o instante em que é interrompido o borbulhamento e o instante em que é aplicado vácuo à coluna. Nessas condições, deu-se de novo o aparecimento da nuvem de bolhas, só que a fronteira inferior desta não se situava já junto da base da coluna, como anteriormente, mas sim a uma distância apreciável desta. A altura inicial da coluna de líquido límpido abaixo da nuvem de bolhas era tanto menor quanto menor fosse o intervalo de tempo decorrido desde a interrupção do borbulhamento até ser aplicado vácuo. Para valores suficientemente elevados desse intervalo de tempo, deixava de ser detectado o aparecimento de qualquer nuvem de pequenas bolhas.

Será interessante perceber o que pode acontecer a microbolhas de diferentes tamanhos durante o intervalo de tempo que decorre até ser aplicado vácuo e saber, por exemplo, quais dessas bolhas será possível encontrar no líquido, em função do tempo decorrido até ser aplicado vácuo.

3.4 ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DE UMA MICROBOLHA DE GÁS IMERSA NUM LÍQUIDO

3.4.1 O processo de difusão do soluto

A evolução de uma bolha de gás muito pequena ($d \leq 100 \mu\text{m}$), imersa num líquido, é função de vários factores, tais como o número de componentes da fase gasosa, o movimento da interface em consequência do deslocamento do líquido circundante (efeito convectivo), a tensão superficial.

Considerando o caso mais simples de uma bolha esférica, de gás puro, e “parada” relativamente ao líquido, a dissolução (ou crescimento) dá-se por difusão de soluto no líquido e a equação correspondente, incluindo um termo convectivo radial é, em coordenadas esféricas (Weinberg, 1981),

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v_r \frac{\partial C}{\partial r} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (3.2)$$

em que C representa a concentração de soluto no líquido, D , a difusividade do gás no líquido, r a distância (radial) ao centro da bolha e v_r a velocidade radial do líquido ao raio r (esta velocidade resulta da contracção ou expansão da bolha).

A variação do número total de moles na bolha, n , supondo gás ideal, à temperatura T , é

$$\frac{dn}{dt} = \frac{d \left(\frac{PV_b}{\mathcal{R}T} \right)}{dt} \quad (3.3)$$

em que P representa a pressão na bolha e $V_b = \frac{\pi}{6} d^3$ o volume da bolha, sendo d o respectivo diâmetro. $\mathcal{R}$ é a constante da equação de estado dos gases perfeitos.

Uma das condições fronteira é ditada pela igualdade entre a variação total do número de moles na bolha, com o tempo, e a taxa molar de transferência de soluto na interface ($r = d/2$), o que é traduzido, em qualquer instante ($t > 0$), por

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\pi}{6} d^3 \frac{P}{\mathcal{R}T} \right) = \pi d^2 D \left(\frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=d/2} \quad (3.4)$$

se C representar a concentração molar de soluto no líquido.

Se P_e for a pressão local exterior à bolha, considerada constante (as variações de pressão hidrostática são desprezáveis), e σ a tensão superficial do sistema gás-líquido, a pressão, P , no interior da bolha é dada, em termos do diâmetro da bolha, por

$$P = P_e + \frac{4\sigma}{d} \quad (3.1)$$

Outra condição fronteira é dada pela concentração (variável) de soluto na interface, C^* , do lado do líquido, relacionada com a correspondente pressão na bolha (igual à pressão total, porque a bolha é constituída por um só componente), através de uma equação do tipo

$$C^* = HP \quad (2.2.a)$$

baseada na lei de Henry.

Pode definir-se a terceira condição fronteira, em termos da concentração média de soluto no líquido, C , longe da interface ($r \rightarrow \infty$), em qualquer instante ($t \geq 0$).

Um caso limite da equação (3.2) consiste em considerar difusão pura a partir de uma esfera, em estado pseudo-estacionário ($\partial C / \partial t = 0$). Estas aproximações parecem ser bastante razoáveis, para gases muito pouco solúveis (Cable e Frade, 1987), e em situações em que a velocidade radial da superfície da bolha, relativamente ao líquido, não seja significativa. Adiante se verá que, no processo de auto-dissolução de uma bolha, a velocidade radial da superfície da bolha apenas se torna significativa nos instantes finais. Há unanimidade em afirmar que bolhas de diâmetro inferior a 300 μm , cuja superfície é facilmente imobilizada por algumas partículas muito pequenas que existam em suspensão no líquido (como provavelmente existirão em água da torneira), se comportam como esferas rígidas (Motarjemi e Jameson, 1978, Clift *et al.*, 1978, Sherwood *et al.*, 1975, Leighton, 1994). Nessas circunstâncias, torna-se predominante o mecanismo de difusão.

Para facilitar a compreensão do problema, analisa-se inicialmente a situação mais simples, considerando o gás constituído por um só componente (gás puro).

3.4.2 Dissolução de uma microbolha de gás, puro, em água previamente saturada

Considerando difusão pura num meio semi-infinito, em estado pseudo-estacionário, a partir de uma bolha de gás puro, a equação (3.2) reduz-se a

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dC}{dr} \right) = 0 \quad (3.2.a)$$

As respectivas condições fronteira são

$$\begin{aligned} r = d/2 & \quad C = C^* \\ r \rightarrow \infty & \quad C = C_0 \end{aligned}$$

representando C^* a concentração de gás que no líquido estaria em equilíbrio com a pressão na bolha ($C^* = HP$) e C_0 a concentração média de gás dissolvido no líquido, longe da bolha, que se pode considerar constante.

A solução da equação (3.2.a) é

$$C = C_0 + \frac{d(C^* - C_0)}{2r} \quad (3.5)$$

o que permite exprimir a taxa de transferência, $\dot{n}$, através da interface, como

$$\dot{n} = -D\pi d^2 \left(\frac{dC}{dr} \right)_{r=d/2} = D2\pi d(C^* - C_0) \quad (3.6)$$

A forma mais geral da expressão que define a taxa de transferência de massa através de uma superfície esférica, de diâmetro d , em termos de um coeficiente de transferência, k , é

$$\dot{n} = k\pi d^2(C^* - C_0) \quad (3.7)$$

Igualando os segundos membros das equações (3.6) e (3.7), obtém-se $kd/D=2$. Comparando este resultado com a definição do número de Sherwood,

$$\text{Sh} = \frac{kd}{D} \quad (3.8)$$

é fácil concluir que, nesta situação, $Sh = 2$, o que é o limite bem conhecido deste número adimensional, para difusão pura a partir de esferas rígidas.

Pretendia conhecer-se (secção 3.3) a evolução de uma microbolha de gás em água que se encontra saturada, à pressão de 1 bar e à temperatura de 20°C.

Substituindo, na equação (3.3), o valor de P (pressão no interior da bolha) dado pela equação (3.1) e fazendo $V_b = \frac{\pi}{6}d^3$, obtém-se

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{RT} \left(\frac{\pi}{2} d^2 P_e + \frac{4\pi}{3} d \sigma \right) \frac{dd}{dt} \quad (3.9)$$

A variação total, com o tempo, do número de moles na bolha é igual ao que é transferido entre a bolha e a água, que, para difusão pura, é

$$-\frac{dn}{dt} = \dot{n} = D2\pi d(C^* - C_0) \quad (3.6.a)$$

Quando $C^* > C_0$, há transferência de gás da bolha para o líquido, o que corresponde a uma variação negativa do número total de moles na bolha.

Pela lei de Henry, expressa sob a forma da equação (2.2.a), e pela definição da pressão no interior da bolha (eq. (3.1)),

$$C^* = H \left(P_e + \frac{4\sigma}{d} \right) \quad (3.10)$$

A pressão exterior à bolha, P_e , é considerada constante e igual a 1 bar (variações de pressão hidrostática desprezáveis). De acordo com as condições adoptadas à partida, C_0 é a concentração de saturação de gás, à pressão de 1 bar ($= P_e$), e, portanto,

$$C_0 = H P_e \quad (3.11)$$

A equação (3.6.a) vem, então, simplesmente

$$-\frac{dn}{dt} = 8\pi DH\sigma \quad (3.12)$$

Combinando as equações (3.9) e (3.12), obtém-se

$$\frac{1}{RT} \left(\frac{\pi}{2} d^2 P_e + \frac{4}{3} \pi d \sigma \right) \frac{dd}{dt} = -8\pi DH\sigma \quad (3.13)$$

Separando variáveis e integrando entre um valor inicial do diâmetro, d_0 , e um valor final, d_f , resulta

$$\Delta t = \frac{1}{12RTDH\sigma} \left[\frac{P_e}{4} (d_0^3 - d_f^3) + \sigma (d_0^2 - d_f^2) \right] \quad (3.14)$$

em que Δt representa o tempo que uma bolha de raio inicial d_0 demora até atingir o raio d_f .

O tempo de dissolução total, t_c , para $d_f = 0$, será simplesmente

$$t_c = \frac{1}{12RTDH\sigma} \left(\frac{P_e}{4} d_0^3 + \sigma d_0^2 \right) \quad (3.15)$$

Por resolução da equação (3.14), obteve-se, como exemplo ilustrativo, a curva representada na figura 3.4, que mostra a evolução do tamanho de uma microbolha de oxigénio puro, de diâmetro inicial igual a 100 μm , imersa em água saturada em oxigénio, à pressão de 1 bar e temperatura de 20°C.

A curva representada na figura 3.4 mostra que o tamanho da bolha varia de uma forma gradual, quase linearmente durante os primeiros 200 segundos e depois mais rapidamente até cerca dos 320 segundos, após o que desaparece, abruptamente, num curto intervalo de tempo.

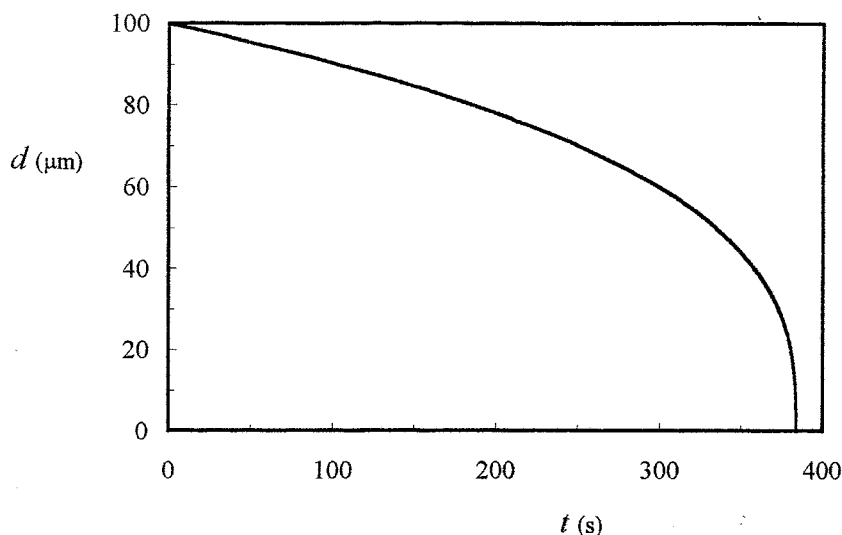


Figura 3.4 - Evolução, com o tempo, do tamanho de uma microbolha de oxigênio, de diâmetro inicial igual a 100 μm , imersa em água saturada em oxigênio (1 bar e 20°C)

Ver-se-á, seguidamente, quais as equações que descrevem o mesmo fenómeno se, em vez de gás puro, se considerar um gás constituído por dois componentes.

3.4.3 Dissolução de uma microbolha de gás, com dois componentes, em água previamente saturada

Analisa-se, de seguida, uma situação idêntica à descrita anteriormente, mas em que o gás é agora constituído por dois componentes. O desenvolvimento que se segue é baseado no que foi feito para um só componente, esperando-se desta forma proporcionar uma mais fácil compreensão. Vão considerar-se bolhas de ar, constituídas (apenas) por oxigênio (21%) e azoto (79%).

Como ambos os gases são solúveis em água, a equação equivalente a (3.6.a) deve agora incluir as taxas de oxigênio e azoto transferidos da bolha para o líquido. Virá então,

$$-\frac{dn}{dt} = D_{\text{O}_2} 2\pi d (C_{\text{O}_2}^* - C_{\text{O}_2}) + D_{\text{N}_2} 2\pi d (C_{\text{N}_2}^* - C_{\text{N}_2}) \quad (3.16)$$

em que os dois termos do lado direito da equação traduzem a taxa de transferência de oxigénio e de azoto, respectivamente, da bolha para a água, considerando, mais uma vez, difusão pura em torno de uma esfera. As concentrações médias de oxigénio e azoto dissolvidos na água (longe da bolha) são representadas por C_{O_2} e C_{N_2} , respectivamente, e, dado que a água se encontra saturada com ar à pressão de 1 bar (P_e), para o oxigénio e o azoto será

$$C_{O_2} = y_{O_2} P_e H_{O_2} = 0,21 P_e H_{O_2} \quad (3.17)$$

e

$$C_{N_2} = (1 - y_{O_2}) P_e H_{N_2} = 0,79 P_e H_{N_2} \quad (3.18)$$

em que y_{O_2} representa a fracção molar de oxigénio no gás, e H_{O_2} e H_{N_2} são as constantes de proporcionalidade da lei de Henry, expressa sob a forma da equação (2.2.a), para o oxigénio e para o azoto, respectivamente.

As concentrações de oxigénio e azoto, $C_{O_2}^*$ e $C_{N_2}^*$, que, no líquido, estariam em equilíbrio com as respectivas pressões parciais na bolha, $p_{O_2} (= y_{O_2} P)$ e $p_{N_2} (= (1 - y_{O_2}) P)$, definem-se como

$$C_{O_2}^* = p_{O_2} H_{O_2} = y_{O_2} \left(P_e + \frac{4\sigma}{d} \right) H_{O_2} \quad (3.19)$$

e

$$C_{N_2}^* = p_{N_2} H_{N_2} = (1 - y_{O_2}) \left(P_e + \frac{4\sigma}{d} \right) H_{N_2} \quad (3.20)$$

Uma vez que as concentrações e os coeficientes de transferência de massa para o oxigénio e o azoto são diferentes, vai haver taxas de transferência distintas, para estes dois

componentes. Como, normalmente, a razão entre os valores das taxas de transferência dos dois solutos não será igual à razão entre os valores iniciais das respectivas fracções molares no gás, as fracções molares de ambos os componentes, na bolha, vão variar, ao longo do tempo.

Pode contudo dizer-se que, num instante inicial ($t \rightarrow 0$), em que se considere $y_{O_2} \cong 0,21$, já que as forças directrizes relativas aos dois componentes se reduzem a

$$(C_{O_2}^* - C_{O_2}) = y_{O_2} \frac{4\sigma}{d} H_{O_2} \quad (3.21)$$

e

$$(C_{N_2}^* - C_{N_2}) = (1 - y_{O_2}) \frac{4\sigma}{d} H_{N_2} \quad (3.22)$$

a taxa molar global de transferência (de oxigénio e azoto) da bolha para o líquido, nesse instante, é, simplesmente,

$$-\frac{dn}{dt} = 8\pi\sigma \left(D_{O_2} H_{O_2} y_{O_2} + D_{N_2} H_{N_2} (1 - y_{O_2}) \right) \quad (3.23)$$

Esta equação é comparável à equação (3.12), obtida para um só componente.

Ainda relativamente a esse instante inicial, vai agora igualar-se o 2º membro da equação (3.23) ao simétrico do da equação (3.9), que define a variação total do número de moles da bolha, com o tempo. Se se tomar um intervalo de tempo inicial suficientemente pequeno, $\Delta t_0 \rightarrow 0$, em que a bolha vai sofrer uma variação de tamanho muito pequena, $\Delta d_0 \rightarrow 0$, é válido considerar as fracções molares de oxigénio e azoto praticamente invariáveis e iguais a 0,21 e 0,79, respectivamente. Nestas condições, a equação resultante da igualdade pode ser integrada analiticamente, ficando

$$\Delta t_0 = \frac{1}{12 \mathcal{R} T \sigma [D_{O_2} H_{O_2} y_{O_2} + D_{N_2} H_{N_2} (1 - y_{O_2})]} \left[(P_e/4) (d_0^3 - (d_0 - \Delta d_0)^3) + \sigma (d_0^2 - (d_0 - \Delta d_0)^2) \right] \quad (3.24)$$

Note-se, mais uma vez, a analogia desta equação com a equação (3.14), obtida para um só componente.

Para qualquer instante posterior, como as fracções molares (no gás) começam a variar, a equação (3.23) deixa de ser válida, sendo necessário escrever a sua forma mais geral, em função de y_{O_2} variável,

$$-\frac{dn}{dt} = 2\pi d \left[\left(P_e + \frac{4\sigma}{d} \right) (D_{O_2} H_{O_2} y_{O_2} + D_{N_2} H_{N_2} (1 - y_{O_2})) - (D_{O_2} C_{O_2} + D_{N_2} C_{N_2}) \right] \quad (3.25)$$

As concentrações C_{O_2} e C_{N_2} , consideradas constantes, continuam a ser as concentrações médias de saturação da água em oxigénio e azoto, à pressão de 1 bar e a 20°C.

Fazendo $A = (D_{O_2} H_{O_2} y_{O_2} + D_{N_2} H_{N_2} (1 - y_{O_2}))$ e $B = (D_{O_2} C_{O_2} + D_{N_2} C_{N_2})$, e igualando o segundo membro da equação (3.25) ao simétrico do da equação (3.9), vem

$$dt = - \frac{d^2 P_e / 4 + 2d\sigma/3}{\mathcal{R} T [(P_e A - B)d + 4\sigma A]} dd \quad (3.26)$$

Como y_{O_2} não é constante e, portanto, A também não é constante, a integração desta equação só pode ser feita analiticamente considerando como limites de integração valores do diâmetro suficientemente próximos, de tal forma que, no intervalo de tempo correspondente a essa variação no tamanho da bolha, as fracções molares possam ser consideradas constantes.

Por aplicação das regras básicas da integração, vem, finalmente, entre dois valores muito próximos do diâmetro da bolha, d_1 e d_{1+1} ,

$$\Delta t = - \left[\frac{a}{2c} (d_{1+1}^2 - d_1^2) + \frac{bc - ae}{c^2} (d_{1+1} - d_1) + \left(\frac{ae^2}{c^3} - \frac{be}{c^2} \right) \ln \frac{cd_{1+1} + e}{cd_1 + e} \right] \quad (3.27)$$

com

$$\begin{aligned} a &= P_e / (4\mathcal{R}T), & b &= 2\sigma / (3\mathcal{R}T), \\ c &= (P_e A - B) & e &= 4\sigma A. \end{aligned}$$

Para cada intervalo, é possível calcular a quantidade total de oxigénio e azoto transferidos entre a bolha e o líquido como

$$n_{O_2} = D_{O_2} 2\pi \bar{d} \left[y_{O_2} \left(P_e + \frac{4\sigma}{\bar{d}} \right) H_{O_2} - C_{O_2} \right] \Delta t \quad (3.28)$$

e

$$n_{N_2} = D_{N_2} 2\pi \bar{d} \left[(1 - y_{O_2}) \left(P_e + \frac{4\sigma}{\bar{d}} \right) H_{N_2} - C_{N_2} \right] \Delta t \quad (3.29)$$

em que se usa um valor médio do diâmetro da bolha, $\bar{d} = (d_{i+1} + d_i) / 2$. Com estas quantidades, determina-se a nova fracção molar de um dos componentes, na bolha. Como $\sum y_i = 1$, obtém-se directamente a fracção molar do outro componente. Usando esses novos valores da composição da bolha, o cálculo prossegue, para um intervalo seguinte, resolvendo novamente a equação (3.27). Este algoritmo pode ser utilizado o número de vezes necessárias até à dissolução completa da bolha ($d_{i+1} \rightarrow 0$), permitindo calcular o tempo total de dissolução como a soma dos vários Δt . O processo de cálculo permite, ainda, observar a evolução contínua do tamanho (e da composição) da bolha com o tempo. Os resultados obtidos para bolhas com diâmetro inicial igual ou menor do que 100 μm apresentam-se no gráfico da figura 3.5.

O gráfico da figura 3.5 mostra que a evolução, com o tempo, de bolhas de diferentes tamanhos é idêntica, na forma. Inicialmente, a variação do tamanho é mais lenta, mas à medida que o tamanho da bolha diminui, o processo de dissolução é acelerado. Isto é explicado pelo efeito crescente que as forças de tensão superficial têm, à medida que as bolhas diminuem (equação (3.1)).

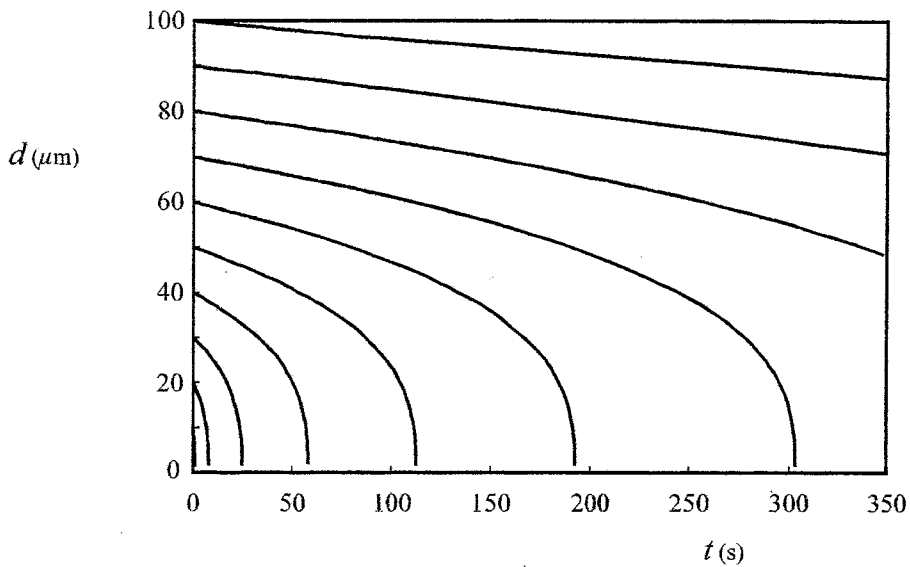


Figura 3.5 - Evolução, com o tempo, do tamanho de microbolhas de ar de diferentes diâmetros iniciais, em água saturada com ar (1 bar e 20°C)

A velocidade terminal, u_t , de subida de esferas (rígidas ou fluídas) em regime de Stokes, $\left(\text{Re} = \frac{\rho u_t d^2}{\mu} < 1\right)$ num líquido, é proporcional ao quadrado do respectivo diâmetro. Como atrás foi referido, as bolhas aqui consideradas podem ser vistas como esferas rígidas. Nessas condições, a velocidade terminal de subida, de uma bolha isolada, de raio d , num líquido parado, é dada por (Clift *et al.*, 1978, p. 35)

$$u_t = \frac{g \Delta \rho d^2}{18 \mu} \quad (3.30)$$

em que g é a aceleração da gravidade, $\Delta \rho$ representa a diferença entre as massas volúmicas do líquido e do gás e μ a viscosidade do líquido. No gráfico da figura 3.6, representam-se as distâncias percorridas ($= u_t \times t$), ao longo do tempo, pelas várias bolhas consideradas para a construção do gráfico da figura 3.5. Como o seu tamanho está a variar continuamente, devido à transferência de massa, a velocidade terminal instantânea é calculada em função do diâmetro da bolha, nesse momento, pela equação (3.30).

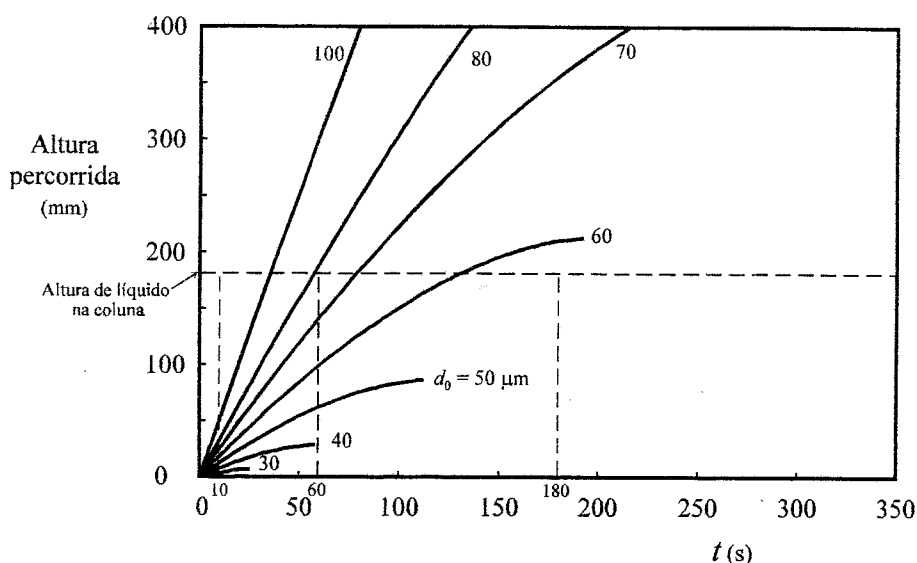


Figura 3.6 - Alturas percorridas por microbolhas de ar, de diferentes diâmetros iniciais, em água parada, saturada com ar (1 bar e 20°C)

No gráfico da figura 3.6, é visível a desaceleração das bolhas com o tempo, à medida que o tamanho diminui. No instante em que a bolha colapsa (ver gráfico da figura 3.5), a curva relativa ao seu deslocamento no líquido “termina”. Isto é visível, no gráfico da figura 3.6, para $d_0 < 70 \mu\text{m}$.

Será interessante voltar a ter presente a situação física que se quis analisar com este desenvolvimento. Pretendia-se saber (secção 3.3) quais as bolhas que, no momento em que se aplica vácuo na coluna, se encontram ainda no líquido, sendo a altura de líquido na coluna cerca de 180 mm.

Ambos os gráficos (figuras 3.5 e 3.6) são necessários para esclarecer essa questão. O gráfico da figura 3.5 mostra o tempo que cada bolha demora a dissolver-se completamente. Uma bolha de diâmetro inicial de $20 \mu\text{m}$ desaparece no intervalo de 8 segundos. Uma bolha com um diâmetro inicial de $70 \mu\text{m}$ já precisa de alguns minutos (~ 5 min) para se dissolver na totalidade. No entanto, antes desse tempo ter decorrido, ela pode de facto já não se encontrar no líquido (ver figura 3.6). Devido ao seu movimento ascensional e ao valor da velocidade terminal de subida, a bolha, inicialmente de $70 \mu\text{m}$, pode atingir a superfície livre do líquido num tempo inferior a cinco minutos. Admitindo que, na pior das hipóteses, ela se forma junto

ao orifício, na base da coluna, como tem que percorrer cerca de 180 mm até chegar à superfície livre, precisa de cerca de 80 segundos para o fazer.

Em resumo, e atendendo à figura 3.6, pode concluir-se que, se decorrerem cerca de 10 segundos antes de ser aplicado vácuo, será improvável a existência de bolhas de diâmetro inicial inferior a 20 μm , pois já terão colapsado; se decorrer cerca de 1 minuto, bolhas com menos de 40 μm de diâmetro inicial já se terão dissolvido totalmente, enquanto que bolhas de tamanho inicial superior a 80 μm provavelmente já se libertaram pela superfície livre; ao fim de cerca de três minutos, será pouco provável existir um número apreciável de bolhas, pois todas elas já terão tido tempo ou de colapsar ($d_0 < 60 \mu\text{m}$) ou de atingir a superfície livre do líquido ($d_0 > 60 \mu\text{m}$).

Imagine-se, então, que o intervalo de tempo decorrido entre a interrupção do borbulhamento e a aplicação de vácuo na coluna é suficientemente pequeno para haver ainda microbolhas dispersas no líquido. Ao ser aplicado vácuo, as microbolhas são sujeitas a uma expansão súbita, podendo algumas delas tornar-se visíveis à vista desarmada. Ver-se-á de seguida quais são essas bolhas, em função da pressão imposta.

3.4.4 Expansão de uma microbolha, por diminuição da pressão

i) Expansão súbita, por aplicação de vácuo

Ao ser aplicado vácuo na coluna, “instantaneamente”, uma microbolha que estava sujeita a uma determinada pressão, fica sujeita a uma pressão bastante mais baixa. Considerando que o número total de moles na bolha não se altera, nesse curto intervalo de tempo, pode escrever-se, segundo a equação de estado dos gases perfeitos, com o valor da pressão no interior da bolha dado pela equação (3.1), e a temperatura constante,

$$\left(P_{e1} + \frac{4\sigma}{d_1}\right) \frac{\pi}{6} d_1^3 = \left(P_{e2} + \frac{4\sigma}{d_2}\right) \frac{\pi}{6} d_2^3 \quad (3.31)$$

O primeiro membro da equação (3.31) refere-se às condições anteriores à aplicação de vácuo (índice 1), e o segundo representa as condições posteriores (índice 2). Conhecidos os valores da pressão exterior à bolha antes e depois da aplicação de vácuo (P_{e1} e P_{e2} , respectivamente), pode calcular-se o diâmetro final da bolha (d_2) que, antes da expansão súbita, tinha diâmetro d_1 .

Para uma redução da pressão externa de 1 bar para 60×10^{-3} bar (valor utilizado nos ensaios experimentais descritos na secção 3.3), apresentam-se na tabela 3.1 vários valores de d_1 e d_2 , sendo estes últimos calculados a partir da equação (3.31).

Tabela 3.1 - Expansão de microbolhas, de d_1 para d_2 , por redução súbita da pressão externa de 1 bar para 60×10^{-3} bar, a 20°C

d_1	d_2
(μm)	(μm)
20	42
36	80
40	90
60	142
80	192
100	242

Os valores tabelados mostram que bolhas com um diâmetro (d_1) igual ou superior a cerca de $36 \mu\text{m}$, à pressão inicial de 1 bar, se tornam visíveis à vista desarmada ($d_2 = 80 \mu\text{m}$), à pressão de 60×10^{-3} bar. Relembra-se que o diâmetro mínimo visível de bolhas de gases em líquidos é, com uma boa iluminação, cerca de $75 \mu\text{m}$.

ii) Expansão, a pressão reduzida, devido à transferência de massa

O que pode ainda acontecer a estas microbolhas nos instantes seguintes à aplicação de vácuo, a pressão reduzida, é um fenómeno interessante. As equações que regem o mecanismo de transferência de massa entre as bolhas e o líquido e que permitem obter a evolução das

microbolhas são ainda as equações (3.26) (que resulta da combinação das equações (3.9), (3.16), (3.19), (3.20) e (3.25)), (3.28) e (3.29), apresentadas na secção 3.4.3.

Num intervalo de tempo pequeno, as concentrações de oxigénio e azoto no líquido, longe da bolha, mantêm-se aproximadamente constantes e iguais aos valores de saturação à pressão de 1 bar e à temperatura de 20°C. A pressão total no interior da bolha, bem como as correspondentes pressões parciais, são agora consideravelmente mais baixas. Portanto, pela aplicação da equação (2.2), os valores de $C_{O_2}^*$ e de $C_{N_2}^*$ também o serão, comparativamente à situação descrita na secção 3.4.3, em que a pressão externa total é a atmosférica. Como, agora, $C^* < C$, para os dois solutos, o sentido do fluxo de transferência de massa inverte-se, passando a ocorrer preferencialmente desabsorção de oxigénio e azoto do líquido para as microbolhas. Estas vão assim aumentar de tamanho, devido ao aumento do número total de moles de gás no seu interior. Considerando apenas esse efeito, a evolução de bolhas de diferentes diâmetros iniciais está representada na figura 3.7. Exceptuam-se microbolhas de diâmetro muito pequeno, da ordem de 2 μm , para as quais, àquela pressão externa (60×10^{-3} bar), ainda se verifica $C^* > C$, devido ao efeito da tensão superficial.

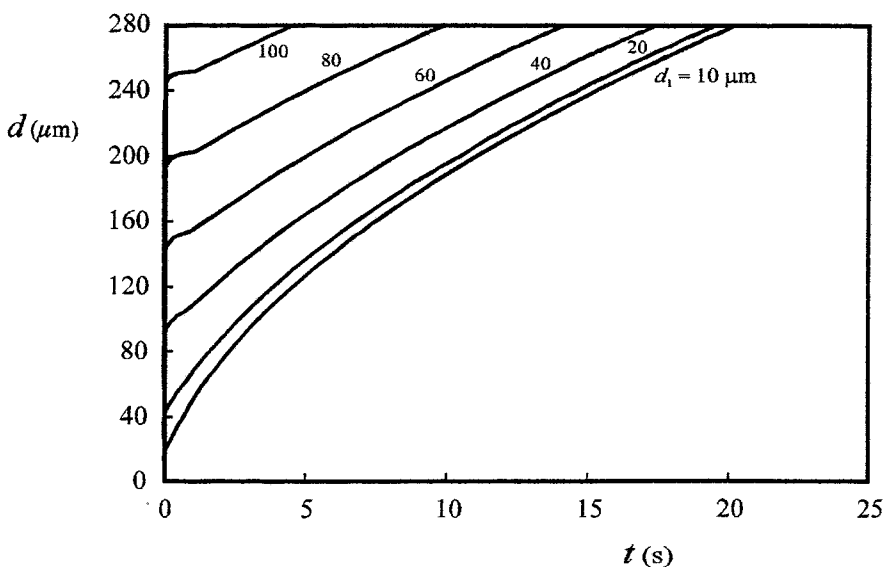


Figura 3.7 - Aumento do tamanho de microbolhas de ar de diferentes diâmetros iniciais, resultante da transferência de oxigénio e azoto do líquido para as bolhas, após aplicação de vácuo (60×10^{-3} bar)

Na figura 3.8, representam-se as distâncias médias percorridas pelas bolhas, considerando, em cada instante, a velocidade terminal calculada pela equação (3.30), com o valor do diâmetro da bolha, nesse instante.

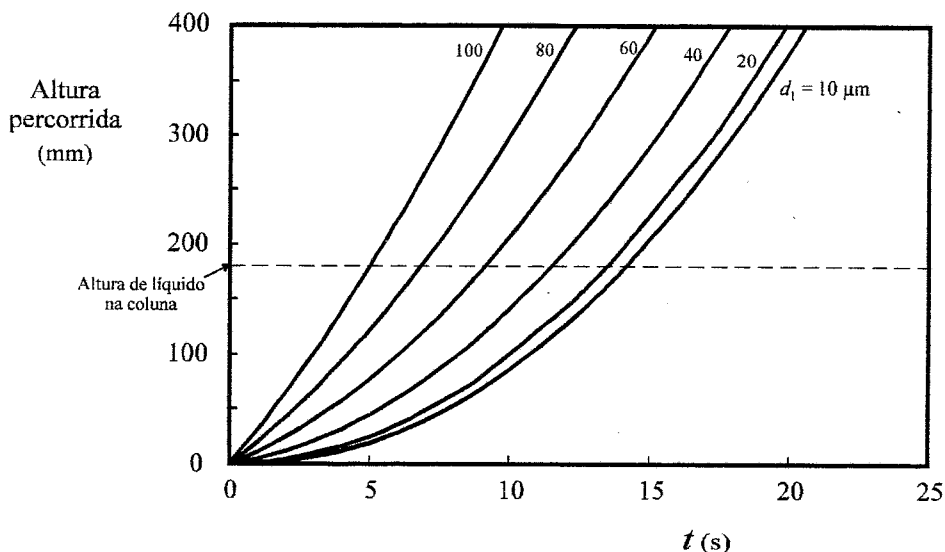


Figura 3.8 - Alturas percorridas pelas microbolhas de ar no líquido parado, posteriormente à aplicação de vácuo (60×10^{-3} bar), tendo em conta a sua expansão, devido à transferência de massa

A figura 3.8 mostra que, num intervalo de tempo muito curto, da ordem dos quinze segundos, todas as microbolhas já terão abandonado o líquido.

Considerou-se, ao fazer estes cálculos, que a pressão externa à bolha era constante e igual a 60×10^{-3} bar. Esta, no entanto, é a pressão do gás à superfície do líquido. A 180 mm de profundidade, essa pressão já é cerca de 78×10^{-3} bar, devido à variação da pressão hidrostática. À medida que se deslocam no sentido da superfície livre do líquido, as bolhas ficam assim sujeitas a uma pressão absoluta externa cada vez mais pequena. Uma bolha que partisse das proximidades da base da coluna sofreria uma expansão de 30% relativamente ao seu volume inicial, apenas pelo efeito da diminuição da pressão hidrostática. Por este facto, e pela expansão devida à desabsorção, mesmo microbolhas mais pequenas ($d_1 < 36 \mu\text{m}$) podem tornar-se visíveis à medida que se aproximam da superfície livre do líquido.

3.5 REFERÊNCIAS FEITAS POR OUTROS AUTORES À EXISTÊNCIA DE MICROBOLHAS EM VÁRIOS SISTEMAS GÁS-LÍQUIDO

Bolhas de dimensões reduzidas podem ter uma contribuição muito importante na taxa global de transferência de massa, devido aos tempos de residência elevados e ao efeito determinante da tensão superficial no acréscimo da pressão no interior das bolhas.

Alguns autores referem que, abaixo de um determinado diâmetro, a superfície dessas bolhas é facilmente “contaminada” por algumas das pequenas partículas existentes em suspensão nos meios naturais (água, por exemplo), o que, entre outros efeitos, reduz a área interfacial disponível, podendo conduzir a um decréscimo da taxa de transferência, relativamente a uma bolha “limpa”. No entanto, essas partículas podem também ser responsáveis por um maior tempo de retenção da bolha no líquido, ao conferir-lhe, por exemplo uma densidade superior, contrariando assim a subida no líquido e saída pela superfície (Leighton, 1994).

A existência de bolhas de muito pequenas dimensões em sistemas gás-líquido é também referida por outros autores (Heijnen *et al.*, 1980, Philip *et al.*, 1990, Muller e Davidson, 1992), sendo salientada a sua importância em operações que envolvem transferência de massa, não só em líquidos viscosos, onde os correspondentes tempos de retenção são ainda mais significativos, mas também em soluções aquosas de sais (Braulick *et al.*, 1965). No entanto, nestes trabalhos, os autores consideram bolhas de diâmetro inferior a 1 mm, mas ainda visíveis à vista desarmada.

É também relevante a abundância de bolhas muito pequenas nas camadas superiores dos oceanos (Merlivat e Memery, 1983, Leighton, 1994).

Como adiante se verá, neste trabalho vai ser dada uma atenção especial a bolhas mais pequenas do que o limite da visibilidade, à vista desarmada.

3.6 FORMAÇÃO DAS MICROBOLHAS

Bolhas muito pequenas podem ter duas origens diferentes, como é genericamente reconhecido (Philip *et al.*, 1990, Muller e Davidson, 1992). Elas podem resultar, em grande número, do rebentamento de uma bolha maior, à superfície do líquido, sendo empurradas alguns centímetros para baixo pelo movimento de retorno da superfície, nesse sentido (MacIntyre, 1972, Pandit *et al.*, 1987). Podem ainda formar-se durante a coalescência de duas ou mais bolhas, junto ao orifício (Philip *et al.*, 1990). A (segunda) bolha, que é “aspirada”, sofre um alongamento, que normalmente resulta na quebra da extremidade inferior em bolhas mais pequenas. Da mesma forma, a coalescência entre bolhas próximas, no seio da coluna de líquido, poderá resultar na formação de bolhas muito pequenas.

Não há qualquer dúvida de que, nas condições experimentais em que foi feito o estudo de transferência de massa, o rebentamento das bolhas maiores à superfície livre do líquido contribui para a formação de um grande número, quer de microbolhas, quer de bolhas claramente visíveis mas de muito reduzidas dimensões (o que aliás se observa, por exemplo, nas fotografias das figuras 2.21, 2.23 ou 2.25). Para verificar se, nas condições do presente trabalho, também há formação de microbolhas na zona de injeção do gás na coluna (junto ao orifício de borbulhamento), planeou-se a experiência que a seguir se descreve.

Considere-se a instalação experimental esquematizada na figura 3.9. A coluna cilíndrica, de acrílico, com diâmetro interno de 100 mm, tem uma altura total de cerca de 400 mm, e na sua base pode adaptar-se um orifício central (de diâmetro variável), para admissão de gás. A parte superior da coluna está unida a uma conduta cônica metálica (ferro galvanizado), e através dela a uma tubagem cilíndrica, de diâmetro igual a 25 mm. Conforme está representado, essa tubagem tem três ramificações, tendo-se colocado uma válvula de esfera em cada uma delas (V1, V2 e V3).

Inicialmente, enche-se a coluna, que foi cuidadosamente limpa, com água destilada até ao nível indicado por “A” na figura e, com as válvulas V1, V2 e V4 fechadas, aplica-se vácuo na coluna, com a válvula V3 aberta. A água é desgaseificada durante alguns minutos (15 a 30 min), de forma a retirar do líquido bolhas muito pequenas aí introduzidas pelo

manuseamento da água. (Essas bolhas seriam igualmente visualizadas uma vez aplicado vácuo à coluna, após o borbulhamento, caso não se tivessem libertado do líquido, entretanto).

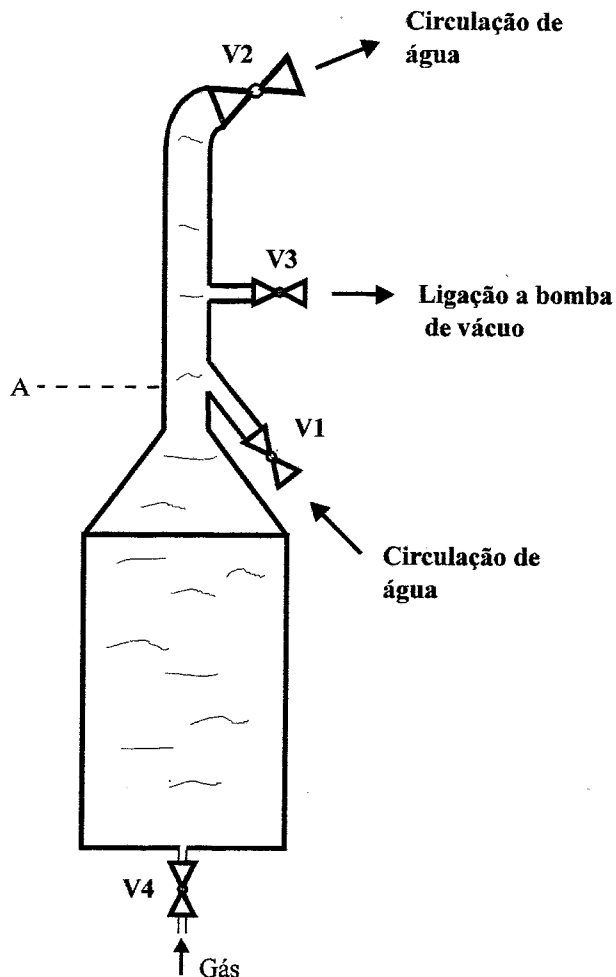


Figura 3.9 - Instalação utilizada para detecção de microbolhas formadas na zona de injeção do gás (corte segundo o eixo)

De seguida, a válvula V3 é fechada, e abrem-se as válvulas V1 e V2. Por acção de uma bomba peristáltica a montante de V1, faz-se circular água, no sentido ascendente da tubagem. Inicia-se, então, o borbulhamento de gás, abrindo a válvula V4. A circulação contínua de água suprime a superfície livre do líquido na coluna, conduzindo as bolhas até à saída da tubagem, onde, finalmente, rebentam. Impede-se, desta forma, que as bolhas muito pequenas formadas

pelo rebentamento das bolhas maiores, na superfície livre do líquido, possam ser arrastadas, para trás, na direcção da coluna.

Decorridos 10 a 15 minutos, o borbulhamento é interrompido, fechando a válvula V4, e, simultaneamente, é desligada a bomba de circulação da água. Logo de seguida, retira-se por gravidade toda a água contida acima da válvula V1, após o que esta é fechada, assim como a válvula V2, e aplica-se vácuo na coluna, abrindo a válvula V3. Decorridos escassos segundos, é perfeitamente visível uma nuvem de bolhas muito pequenas, no seio da coluna. Esta nuvem tem um aspecto idêntico ao que se pode ver na fotografia da figura 3.3, relativa aos ensaios descritos na secção 3.3. O mesmo fenómeno foi observado, quer com um orifício central de borbulhamento de 3,0 mm de diâmetro, quer com um de 0,3 mm, para caudais idênticos de gás (cerca de $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$).

Confirmou-se, desta forma, que, nas condições deste trabalho, o borbulhamento intenso de gás através dos orifícios promove, simultaneamente com as bolhas maiores, a formação de um grande número de bolhas muito pequenas (microbolhas), que não têm origem na superfície livre.

No capítulo seguinte vai analisar-se qualitativa e quantitativamente a contribuição das microbolhas para a transferência de massa nos processos de borbulhamento em estudo no presente trabalho.

4 CONTRIBUIÇÃO DAS MICROBOLHAS PARA A TRANSFERÊNCIA DE MASSA NOS PROCESSOS DE BORBULHAMENTO EM ESTUDO

4.1 ORGANIZAÇÃO DO CAPÍTULO

No capítulo anterior falou-se já da grande importância que as microbolhas podem ter em geral nos processos de transferência de massa por borbulhamento. Foi também feita alguma análise quantitativa do processo de absorção a partir de uma microbolha e forneceu-se ampla evidência sobre a existência de microbolhas nos borbulhadores em estudo, neste trabalho.

No presente capítulo é feito o estudo dos processos de transferência associados às microbolhas, na situação mais concreta das experiências realizadas.

Na secção 4.2 faz-se uma análise qualitativa da evolução de microbolhas de ar e azoto em água; na secção 4.2.2 discute-se a *dissolução de uma microbolha de ar, em água com oxigénio e azoto dissolvidos*, que é uma situação típica na coluna de absorção das experiências tipo A, enquanto a secção 4.2.3 trata da *dissolução de uma microbolha de azoto, em água com oxigénio e azoto dissolvidos*, que é uma ocorrência típica na coluna de *stripping* nas experiências tipo C.

Pelo facto de as microbolhas terem papéis tão distintos nos processos de absorção e desabsorção, a comparação destes dois processos pode servir de indicador sobre a presença de microbolhas nos borbulhadores. Na secção 4.3 é descrito um conjunto de experiências simples que tiram partido destas características e ilustram as diferenças e analogias previstas entre absorção e desabsorção. As secções 4.4 a 4.6 fornecem as análises detalhadas que suportam o estudo realizado, culminando na apresentação de um algoritmo de simulação, do qual são extraídas conclusões em termos quantitativos.

4.2 ANÁLISE QUALITATIVA DA EVOLUÇÃO DE MICROBOLHAS DE AR E DE AZOTO IMERSAS EM ÁGUA COM OXIGÉNIO E AZOTO DISSOLVIDOS

4.2.1 Introdução

No sistema em estudo - coluna de borbulhamento - a circulação do líquido, induzida pelo borbulhamento do gás, influencia fortemente o movimento e, conseqüentemente, o tempo de residência das microbolhas na coluna de líquido. Independentemente da sua origem, e em função do seu tamanho, elas serão mais ou menos arrastadas pelas correntes de circulação de líquido, podendo permanecer nessas células de agitação por períodos de tempo elevados (figura 4.1).

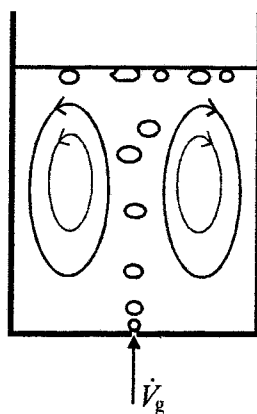


Figura 4.1 - Identificação de células de agitação de líquido na coluna de borbulhamento

São, certamente, as bolhas mais pequenas aquelas que mais dificilmente se desprendem das células de agitação e, uma vez libertas, as que sobem mais lentamente no líquido.

Como se viu pela equação (3.1), o efeito da tensão superficial no aumento da pressão no interior de uma bolha é tanto mais importante quanto menor o seu tamanho. Em condições favoráveis à dissolução da bolha, à medida que esta vai diminuindo de tamanho, o aumento

de pressão no seu interior é cada vez mais significativo. Com o consequente aumento de C^* , para os vários solutos, verifica-se um aumento crescente da(s) força(s) directriz(es), $(C^* - C)$, para a transferência de massa. A velocidade de dissolução da bolha é assim acelerada. Por isso, a probabilidade de uma bolha chegar a dissolver-se completamente, antes de se libertar pela superfície, é obviamente tanto maior quanto menor o seu tamanho, para a mesma concentração média de soluto(s) no líquido.

É muito provável que, acompanhando o movimento do líquido (figura 4.1), uma bolha suficientemente pequena permaneça na coluna o tempo necessário à sua completa dissolução. Se, eventualmente, ela se desprender dessas células de agitação, seguindo uma trajectória aproximadamente vertical, o movimento da bolha em direcção à superfície livre do líquido é progressivamente retardado (equação (3.30)), devido à sua diminuição de tamanho, sendo igualmente pouco provável libertar-se do líquido antes de se dissolver totalmente.

Viu-se, nas secções 3.4.2 e 3.4.3, como, mesmo em água saturada, bolhas muito pequenas de gás têm tendência a desaparecer. Quanto mais a concentração média de gás dissolvido no líquido (C) for inferior à concentração de equilíbrio (C^*), mais a dissolução das microbolhas será favorecida, pois maior será a força directriz, $(C^* - C)$, para a transferência de massa.

4.2.2 Dissolução de uma microbolha de ar, em água com oxigénio e azoto dissolvidos

Considere-se uma microbolha de ar (21% de O_2 e 79% de N_2), com um determinado diâmetro inicial, imersa em água, na qual existem oxigénio e azoto dissolvidos.

Veja-se o que pode acontecer se as concentrações de ambos os solutos no líquido forem inferiores às correspondentes concentrações de equilíbrio com o ar exterior. Admite-se que a massa de água é suficientemente grande para que as concentrações médias dos solutos não se alterem pela transferência que ocorre através da(s) microbolha(s). Inicialmente, a bolha começa por transferir oxigénio e azoto para o líquido, o que resulta numa diminuição do seu

tamanho. Por essa via, a pressão no interior da bolha aumenta, devido ao efeito da tensão superficial (equação (3.1)). Normalmente, a razão entre os valores das taxas de transferência dos dois solutos não será igual à razão entre as respectivas fracções molares no interior da bolha e, portanto, estas irão variar, relativamente aos valores iniciais. Se, no processo de transferência, a fracção molar de O_2 na bolha for diminuindo, a fracção de azoto aumentará correspondentemente. Em consequência, a força directriz para a transferência de oxigénio teria tendência para diminuir e a do azoto para aumentar. Contudo, importa não esquecer que a dissolução dos dois solutos acarreta uma diminuição do diâmetro da bolha e, portanto, um aumento da pressão no interior desta, devido à tensão superficial. Como a pressão parcial do soluto no gás (p_i) é igual ao produto da pressão total pela fracção molar, para o azoto, p_{N_2} aumentará necessariamente (pelos dois efeitos) e, para o oxigénio, p_{O_2} poderá diminuir (pelo efeito predominante da diminuição da fracção molar), ou aumentar (quando, para valores pequenos do diâmetro, o aumento da pressão no interior da bolha se sobrepuser à diminuição da fracção molar). À medida que a bolha se torna mais pequena, a influência da tensão superficial é cada vez mais importante, acelerando o colapso da bolha.

Imagine-se agora que a concentração de azoto dissolvido no líquido é superior à correspondente concentração de equilíbrio com a pressão parcial de azoto na bolha e que o mesmo acontece para o oxigénio. Nesta situação, haverá transferência de oxigénio e de azoto para a bolha, e, normalmente, como consequência, ela aumentará de tamanho.

Se, contudo, a concentração de azoto dissolvido no líquido for superior à correspondente concentração de equilíbrio com o azoto existente na bolha e para o oxigénio acontecer o inverso, a conclusão quanto à evolução da bolha não é evidente. Como é óbvio, inicialmente haverá transferência de azoto da água para a microbolha, e transferência de oxigénio da bolha para a água. Se a taxa molar de transferência de N_2 for inferior à taxa molar de transferência de O_2 , a bolha vai “perder” efectivamente gás, diminuindo de tamanho. A fracção molar de oxigénio (y_{O_2}) diminui, não só porque a bolha está a perder oxigénio, mas também porque está a entrar azoto na bolha. Uma vez que a bolha diminui de tamanho, a pressão no seu interior aumenta, e isto faz com que a concentração de equilíbrio

de oxigénio ($C_{O_2}^*$) não diminua tanto quanto a fracção molar correspondente. Por sua vez, a concentração de equilíbrio com a pressão parcial de azoto na bolha ($C_{N_2}^*$) aumenta ainda mais do que y_{N_2} , o que desfavorece a transferência de azoto da água para a bolha. O efeito da tensão superficial é, como se pode ver, preponderante. Pode acontecer que, em determinado momento, devido à saída contínua de oxigénio, à entrada de azoto e ao aumento crescente da pressão no interior da bolha, a pressão parcial de azoto atinja um valor tal que a concentração em equilíbrio com essa pressão se torna superior à concentração de azoto dissolvido no líquido. Então, passa a haver transferência dos dois solutos da bolha para o líquido (absorção). O aumento da pressão no interior da bolha e o correspondente aumento das forças directrizes dos dois solutos impede que o processo se reverta, tornando-se inevitável o colapso da bolha.

Esta situação é a que corresponde, realmente, às condições dos ensaios de absorção, descritos como ensaios tipo A (secção 2.2.2). Recorda-se que se borbulhava ar na coluna de borbulhamento, promovendo-se a passagem da água por uma outra coluna em que estava a borbulhar azoto puro. Como se verá oportunamente (secção 4.6), a concentração média de azoto dissolvido no borbulhador principal toma um valor intermédio entre a concentração de saturação da água com azoto puro e o valor da concentração de saturação da água com o azoto do ar.

A existência de microbolhas na água, em número significativo, pode ser responsável por uma diferença considerável na taxa de transferência, quando está a ocorrer absorção de oxigénio do ar para água. O colapso de microbolhas de ar resulta, como já se viu, na transferência, para a água, de todo o seu oxigénio. Mesmo representando uma pequena fracção do volume total de gás presente na coluna de borbulhamento, em cada instante, a contribuição efectiva deste tipo de bolhas pode ser bastante importante.

Da análise qualitativa anterior, que será mais adiante (secção 4.6) pormenorizada em termos quantitativos, conclui-se que, se o gás borbulhante der origem à formação de

microbolhas, o oxigénio nelas contido será integralmente dissolvido no líquido, por via das elevadas pressões existentes no interior destas microbolhas.

Ver-se-á de seguida como a dissolução destas bolhas poderá explicar que os coeficientes de transferência determinados experimentalmente se situem tanto acima dos valores teóricos. Considere-se, por exemplo, o coeficiente de transferência de massa na formação das bolhas, $(kA)_f$. Os resultados apresentados no Capítulo 2 (secção 2.5.4) mostram que os valores de $(kA)_f$ determinados experimentalmente são sistematicamente muito superiores aos correspondentes valores de $(kA)_f$ previstos por correlações teóricas.

Pode então admitir-se que a taxa de transferência de oxigénio, $\dot{n}_l$, calculada a partir dos resultados experimentais de $(kA)_f$, C^* e C , como

$$\dot{n}_l = (kA)_f (C^* - C) \quad (2.1.a)$$

será constituída por duas parcelas, uma efectivamente relativa à formação das bolhas visíveis e outra correspondente à dissolução de microbolhas no líquido, $\dot{n}_{mb}$. Ficarà, então,

$$\dot{n}_l = (kA)_f^{ap} (C^* - C) = (kA)_f^v (C^* - C) + \dot{n}_{mb} \quad (4.1)$$

em que $(kA)_f^{ap}$ representa o valor “aparente” de $(kA)_f$ determinado experimentalmente e $(kA)_f^v$ o “verdadeiro” valor do coeficiente de transferência de massa na formação das bolhas visíveis.

Se se imaginar que, do caudal de gás, $\dot{V}_g$, alimentado à coluna pelo orifício, uma fracção α (desse gás) está continuamente a ser fragmentada em microbolhas e que essas microbolhas são completamente dissolvidas no líquido, irá observar-se uma taxa de dissolução de oxigénio, $\dot{n}_{mb}$, dada por

$$\dot{n}_{mb} = \alpha \dot{V}_g C_{in} \quad (4.2)$$

em que C_{in} representa a concentração inicial de oxigénio nas microbolhas de ar. Deverá então ser possível dizer que

$$(kA)_f^{ap}(C^* - C) = (kA)_f^v(C^* - C) + \alpha \dot{V}_g C_{in} \quad (4.3)$$

Se se considerar $(kA)_f^v$ igual ao valor teórico do coeficiente de transferência de massa na formação, para as condições consideradas, pode determinar-se a fracção, α , do caudal de gás, que seria necessária para justificar o afastamento entre $(kA)_f^{ap}$ e $(kA)_f^v$. Da equação (4.3), vem

$$\alpha = \frac{[(kA)_f^{ap} - (kA)_f^v](C^* - C)}{\dot{V}_g C_{in}} \quad (4.4)$$

O valor de α foi calculado para alguns casos concretos, apresentando-se os resultados obtidos na tabela 4.1. Tomou-se como valor médio para a concentração de oxigénio, C_{in} , na fase gasosa, $0,271 \text{ kg/m}^3$ (pressão de 1 bar, temperatura de 25°C , fracção molar de oxigénio igual a 0,21) e utilizaram-se, para $(kA)_f^v$, os valores de $(kA)_f$ previstos pela correlação de Zheleznyak (equação (2.29)).

Tabela 4.1 - Valores de α , calculados pela equação (4.4), para diferentes orifícios e caudais de gás

ϕ (mm)	$\dot{V}_g \times 10^6$ (m ³ /s)	$(kA)_f^{ap} \times 10^6$ (m ³ /s)	$(kA)_f^v \times 10^6$ (m ³ /s)	h (mm)	$(C^* - C) \times 10^3$ (kg/m ³)	$\alpha \times 10^3$
0,2	2,3	0,330	0,080	60	5,48	2,2
				180	4,43	1,8
	8,0	0,812	0,100	60	3,73	1,2
0,3	10	0,318	0,155	60	4,02	0,2
	20	1,276	0,193	60	3,32	0,7
3,0	20	1,115	0,171	60	3,95	0,7
	48	1,890	0,389	60	2,72	0,3

Como se pode ver pela tabela 4.1, todos os valores de α obtidos são muito pequenos, o que significa que uma fracção muito pequena do caudal de gás injectado na coluna, dispersa sob a forma de microbolhas, pode justificar o acréscimo verificado na taxa de transferência de oxigénio para a água. A ordem de grandeza dos valores de α calculados torna-os fisicamente aceitáveis. É razoável admitir que, por exemplo, de um caudal de borbulhamento de $48 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, $1,5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ possa ser disperso sob a forma de microbolhas.

Não se pode desde já afirmar que este seja o único mecanismo responsável pelo acréscimo da taxa de absorção de oxigénio. No entanto, os valores extremamente pequenos de α evidenciam claramente a enorme relevância que o mecanismo de dissolução das microbolhas pode ter no processo de absorção.

Uma forma de confirmar a importância do mecanismo de dissolução de microbolhas, nas condições do trabalho presente, foi a realização de ensaios de desabsorção de oxigénio da água para uma corrente de azoto. A descrição destes ensaios será feita um pouco mais adiante (secção 4.3).

Quando, em vez de ar, se borbulha azoto na água, utilizando os mesmos orifícios e caudais de borbulhamento, e mantendo as mesmas condições hidrodinâmicas, o mecanismo de transferência de oxigénio entre bolhas e líquido não deverá ser significativamente alterado. Os coeficientes (incluindo as áreas interfaciais) de absorção de oxigénio (do ar para a água) e de desabsorção (da água para a corrente de azoto), deveriam, por isso, ser idênticos, dadas as semelhanças entre as propriedades físicas do ar e do azoto. Mostrar-se-á seguidamente que a existência de microbolhas na água pode tornar estes dois coeficientes substancialmente diferentes.

Em condições de operação idênticas, a probabilidade de formação de microbolhas de ar ou azoto, quando se borbulha um ou outro gás na água, é a mesma. A evolução das microbolhas, num e noutro caso, não será, no entanto, necessariamente idêntica.

Na secção seguinte analisa-se, em termos qualitativos, a evolução de uma microbolha de azoto em água com oxigénio e azoto dissolvidos, de forma a prever qual a influência que ela poderá ter na desabsorção de oxigénio.

4.2.3 Dissolução de uma microbolha de azoto, em água com oxigénio e azoto dissolvidos

Considere-se uma microbolha de azoto puro imersa em água com oxigénio e azoto dissolvidos, sendo a concentração de azoto no líquido inferior à concentração de saturação da água com azoto puro, à pressão da bolha.

Como a pressão parcial de oxigénio na bolha é nula, é evidente que, no início, há desabsorção de oxigénio (da água para a bolha) e absorção de azoto (da bolha para o líquido). Se a taxa de transferência de oxigénio para a bolha for superior à taxa de absorção de azoto, a bolha começa por aumentar de tamanho. A entrada de oxigénio na bolha provoca a diminuição da fracção molar de azoto na bolha. Como esta está a aumentar de tamanho e, por isso, o efeito da tensão superficial não contraria a diminuição da pressão parcial de azoto, $C_{N_2}^*$ diminui mais, o que se traduz num decréscimo da força directriz relativa à absorção deste soluto. A fracção molar de oxigénio na bolha aumenta, o que também vai provocar uma diminuição da força directriz relativa à desabsorção de oxigénio para a bolha. É possível que, em determinado momento, já que continua a haver saída de azoto da bolha, a pressão parcial de oxigénio se torne superior à que estaria em equilíbrio com a correspondente concentração no líquido. Nesse instante, a bolha passa a perder ambos os solutos, mesmo que a uma taxa diminuta, dada a proximidade das condições de equilíbrio, e começa assim a diminuir de tamanho, podendo dissolver-se na totalidade.

Pode desde já concluir-se que, quando se está a promover a oxigenação de água, a dissolução das microbolhas vai no sentido de activar a transferência de oxigénio, enquanto que, quando se está a fazer *stripping* de oxigénio, a dissolução total das microbolhas terá um efeito nulo na taxa de desabsorção de oxigénio. Dissolvendo-se as microbolhas na totalidade, o oxigénio inicialmente transferido, da água para as microbolhas, é “restituído” à água.

Na secção seguinte as conclusões desta explicação qualitativa irão ser exploradas experimentalmente com vista a melhor elucidar sobre a influência da existência de microbolhas nos coeficientes de transferência de massa anteriormente obtidos.

4.3 COMPARAÇÃO DOS PROCESSOS DE ABSORÇÃO E DE DESABSORÇÃO, POR VIA EXPERIMENTAL

4.3.1 Ensaio de desabsorção realizados nas condições dos ensaios tipo A

De acordo com a análise qualitativa feita nas secções 4.2.2 e 4.2.3, prevê-se que, em borbulhamentos que favoreçam a formação de um número considerável de bolhas muito pequenas (microbolhas), os coeficientes de transferência de massa (incluindo a área interfacial), em absorção, possam ser significativamente diferentes dos de desabsorção, para o mesmo soluto. Uma condição favorável à formação de microbolhas é o borbulhamento intenso do gás. Em grande parte dos ensaios realizados em estado estacionário (tipo A, nomeadamente), para determinação das taxas de transferência de oxigénio (secção 2.2.2), os caudais de borbulhamento utilizados davam origem a uma elevada turbulência na formação e no rebentamento das bolhas à superfície.

A determinação, em condições idênticas, de coeficientes globais de desabsorção de oxigénio, na coluna de borbulhamento (experiências tipo C), permitiu provar, como se irá mostrar a seguir, que estes são, na sua grande maioria, inferiores aos determinados para absorção. Utilizou-se, para o efeito, uma instalação como a que está representada na figura 4.2.

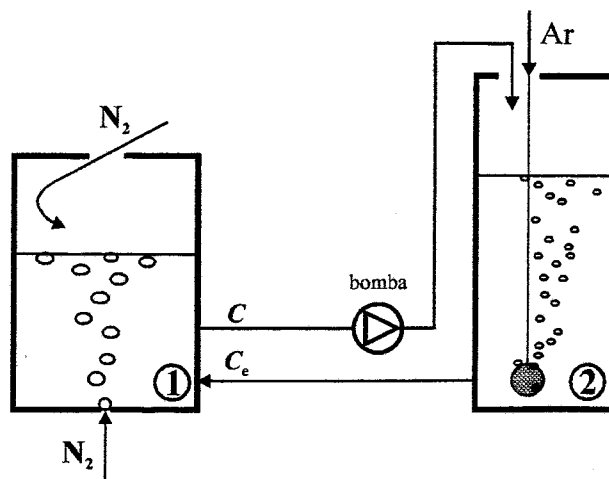


Figura 4.2 - Desabsorção de oxigénio na coluna de borbulhamento (1)

Na coluna com o orifício (coluna 1), borbulha azoto, e assegura-se também que a pressão parcial de oxigénio é nula, na atmosfera em contacto com o líquido. Isto é conseguido, fazendo circular nessa zona uma corrente de azoto puro, da mesma forma que foi descrita nos ensaios tipo B (absorção de oxigénio através da superfície livre do líquido, secção 2.2.2). Em cada ensaio, a concentração de oxigénio no gás acima da superfície livre era continuamente medida, utilizando o analisador de oxigénio gasoso. Por manipulação do caudal de azoto admitido sobre a superfície livre do líquido, assegurava-se que a percentagem de oxigénio no gás fosse inferior a 0,1%.

Na coluna 2 borbulha ar, e a água circula entre as duas colunas, sendo impulsionada de 1 para 2 por acção de uma bomba peristáltica e retornando de 2 para 1 por gravidade.

Assim, na coluna 1, ocorre desabsorção de oxigénio da água para a corrente de azoto, enquanto na coluna 2 se dá o fenómeno inverso - absorção de oxigénio do ar para a água.

Estas experiências permitiram a determinação dos coeficientes globais de desabsorção de oxigénio, em condições idênticas às utilizadas nos ensaios de absorção: mesmos orifícios, caudais de borbulhamento e alturas de líquido na coluna 1.

Prova-se (Apêndice A.2) que, para as alturas de líquido adoptadas, a pressão parcial de oxigénio numa bolha de azoto à saída da coluna 1 se pode ainda considerar praticamente zero. Portanto, a concentração de oxigénio em equilíbrio com essa pressão ($C_{O_2}^* = H_{O_2} p_{O_2}$) é também nula.

Então, a taxa de desabsorção de oxigénio da água, para a corrente de azoto, pode ser representada, de forma idêntica à equação (2.4), por

$$\dot{n} = (kA)_{\text{global}}^d (0 - C) \quad (4.5)$$

em que o índice *d* se refere a *desabsorção* e o coeficiente global relativo à desabsorção é agora designado por $(kA)_{\text{global}}^d$.

Igualando o 2º membro da equação (4.5) ao 2º membro da equação (2.6), que se relembra ser

$$\dot{n} = \dot{v}_L (C - C_e) \quad (2.6)$$

o coeficiente global de desabsorção é finalmente dado por

$$(kA)_{\text{global}}^d = \frac{\dot{v}_L (C - C_e)}{(O - C)} \quad (4.6)$$

em que $\dot{v}_L$, C e C_e são os valores medidos, em cada ensaio deste tipo, do caudal de circulação de água, e da concentração de oxigénio à saída e à entrada da coluna 1, respectivamente.

Tal como seria de esperar, obtiveram-se, na generalidade, para os vários ensaios, valores de $(kA)_{\text{global}}^d$ inferiores aos correspondentes valores de $(kA)_{\text{global}}$, determinados para absorção a partir dos resultados dos ensaios tipo A. Para determinadas condições, registaram-se valores de $(kA)_{\text{global}}$ cerca de duas vezes superiores aos valores correspondentes de $(kA)_{\text{global}}^d$. Os resultados obtidos apresentam-se no Capítulo 5.

4.3.2 Comparação de absorção e desabsorção a baixos caudais de borbulhamento

Tendo o estudo experimental acima referido (e detalhado no Capítulo 5) comprovado a importância das microbolhas, para borbulhamento intenso do gás, pensou-se ser fundamental esclarecer se, para baixos caudais de borbulhamento, os coeficientes globais de transferência seriam idênticos, para absorção e para desabsorção, já que nessa situação não se prevê a formação de um número significativo de microbolhas.

Com esse objectivo, foram realizadas duas experiências, uma de absorção e outra de desabsorção, em condições experimentais distintas das que foram adoptadas nos ensaios anteriormente descritos (tipo C), dado estar a utilizar-se um caudal de gás muito pequeno (efectivamente, estas experiências foram repetidas, tendo-se obtido resultados concordantes). Utilizou-se uma coluna com um diâmetro interno de 70 mm. Conforme está representado na

figura 4.3, a coluna tem, na base, um orifício central (com um diâmetro de 3,0 mm) e no topo da coluna, foi ajustado um adaptador cónico, com o objectivo de reduzir substancialmente a área da superfície livre do líquido.

Durante a experiência, não havia entrada ou saída de água da coluna (sistema “batch”).

Na experiência de absorção, um volume conhecido de água da torneira foi previamente degaseificada, por aplicação de vácuo, de forma a retirar grande parte do gás dissolvido. A concentração de oxigénio dissolvido na água, no final dessa operação, foi medida e registada. O volume de água utilizado permitiu encher a coluna até ao topo do cone. Iniciou-se então o borbulhamento com ar, a um caudal muito pequeno ($0,81 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$), sendo a frequência de formação de bolhas muito baixa (cerca de duas bolhas por segundo).

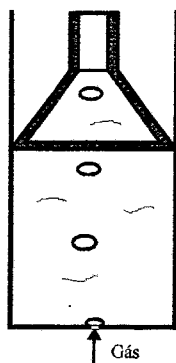


Figura 4.3 - Coluna utilizada para determinação de coeficientes globais de absorção e desabsorção, a baixos caudais de borbulhamento

Não havendo turbulência significativa, quer na formação, quer no rebentamento da(s) bolha(s) à superfície, a possibilidade de formação de microbolhas ficou muito reduzida.

Ao fim de um determinado tempo (da ordem dos 50 a 60 minutos), o borbulhamento foi interrompido, medindo-se a concentração final de oxigénio dissolvido na água.

O ensaio de desabsorção foi realizado de forma análoga. A coluna foi cheia com um volume igual de água da torneira e, registada a concentração inicial de oxigénio dissolvido, fez-se borbulhar azoto, ao mesmo caudal ($0,81 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$). Decorrido um intervalo de tempo

idêntico, interrompeu-se o borbulhamento e mediu-se a concentração final de oxigénio dissolvido na água.

A determinação dos correspondentes coeficientes globais de transferência de massa, relativos a absorção e a desabsorção, em estado transitório, é descrita no Apêndice A.4, tendo-se obtido valores médios muito próximos: $0,146 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, para absorção e $0,144 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, para desabsorção.

Como a transferência pela superfície livre foi minimizada, pode dizer-se que, nesta situação, as contribuições (quase exclusivas) para a transferência de oxigénio são a formação das bolhas no orifício e as bolhas em ascensão no líquido. O valor previsto para o coeficiente de transferência de massa na formação, pela equação (2.27.a), é de $1,39 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$, tomando o diâmetro da bolha igual a 9,3 mm (equação (A.3.17)). Este valor do diâmetro é idêntico ao calculado a partir da frequência (constante) de 2 bolhas por segundo, como $d_e = \left[(0,81 \times 10^{-6} / 2) \times 6 / \pi \right]^{1/3} \times 1000 = 9,2 \text{ mm}$. Considerando a velocidade terminal da bolha igual a 0,24 m/s (Churchill, 1988, p. 413), a área interfacial *equivalente* por unidade de altura de líquido, a_{es}^* , foi calculada pela equação (2.14), como $2,18 \times 10^{-3} \text{ m}$. O coeficiente de transferência relativo à subida, k_s , foi estimado em $3,63 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, pela equação (2.17). Fazendo o produto deste valor por a_{es}^* e pela altura de líquido na coluna ($h = 135 \text{ mm}$), obtém-se $(ka^*)_s h = 0,107 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, que adicionado ao coeficiente de transferência relativo à formação, atrás indicado, dá, como coeficiente global de transferência, na situação analisada, $0,121 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$. Tal como se esperaria, por não haver formação apreciável de microbolhas, o valor teórico do coeficiente global de transferência é muito próximo dos valores experimentais obtidos.

4.4 ANÁLISE QUANTITATIVA DA DISSOLUÇÃO OU CRESCIMENTO DE MICROBOLHAS EM ÁGUA

4.4.1 Aspectos gerais

A equação geral de difusão de um soluto gasoso no líquido, a partir de uma bolha esférica, foi já apresentada na secção 3.4.1 (equação (3.2)), com as respectivas condições fronteira.

Vários autores (Epstein e Plesset, 1950, Scriven, 1959, Duda e Vrentas, 1969, 1971, Ward e Tucker, 1975, Weinberg, 1981, Subramanian e Weinberg, 1981, Ward *et al.*, 1982, Vrentas *et al.*, 1983, Weinberg, 1986, Ward *et al.*, 1986, Cable e Frade, 1987, Yung *et al.*, 1989) apresentam soluções numéricas deste problema, para diferentes sistemas, um ou mais componentes solúveis, atendendo ou não ao efeito da tensão superficial, da pressão de vapor do líquido na fase gasosa, ou ainda à possível presença de inertes. Os métodos matemáticos requeridos para resolver a situação mais geral, que nenhum dos autores referidos estuda, não são simples.

Um caso limite da equação (3.2), e que é representativo para este estudo, consiste em desprezar o termo convectivo e o termo $\partial C/\partial t$, o que corresponde a considerar difusão pura a partir de uma esfera rígida, em estado pseudo-estacionário. Tal como se viu na secção 3.4.1, justifica-se ser válido considerar predominante o mecanismo de difusão, nas condições deste estudo, e para o tipo de bolhas que se pretende analisar.

O objectivo da análise seguinte é conseguir uma boa estimativa da velocidade de dissolução ou crescimento de uma bolha e verificar se, durante o tempo em que se prevê que a bolha pode permanecer no líquido, a taxa de transferência que se lhe pode atribuir é ou não significativa.

Note-se que a análise já feita na secção 3.4, sobre a dissolução de microbolhas de gás, contemplou apenas, em detalhe, o caso particular em que o líquido se encontra saturado com os solutos constituintes do gás. Na presente secção vai analisar-se o caso mais geral, em que as concentrações dos solutos dissolvidos no líquido podem tomar quaisquer valores.

Vai considerar-se, então, que a transferência de massa entre as microbolhas e o líquido se faz por difusão pura. Já foi este o procedimento adoptado nas secções 3.4.2 e 3.4.3, para analisar a dissolução de microbolhas em água saturada. O algoritmo que a seguir se desenvolve é idêntico ao então apresentado, mas no caso presente, as concentrações dos solutos dissolvidos no líquido, longe da bolha, podem tomar quaisquer valores. A verificação deste algoritmo foi feita aplicando-o a sistemas estudados por outros autores (Epstein e Plesset, 1950, Yung *et al.*, 1989), sendo os resultados obtidos, neste trabalho, muito semelhantes aos que esses autores obtiveram, como adiante se verá (secção 4.5).

Começa-se por apresentar, de seguida, a solução para o problema mais simples, de dissolução de bolhas de gás puro (secção 4.4.2), e trata-se, posteriormente, a dissolução de bolhas com vários componentes (secção 4.4.3).

4.4.2 Microbolhas de gás puro

Considere-se uma bolha muito pequena, de diâmetro d , por exemplo de oxigénio, imersa em água com uma dada concentração de oxigénio dissolvido, C_{O_2} , considerada constante.

A variação do número total de moles na bolha, com o tempo, pode ser expressa, a partir da equação de estado dos gases perfeitos, como

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{RT} \left(\frac{\pi}{2} d^2 P_e + \frac{4\pi}{3} d \sigma \right) \frac{dd}{dt} \quad (3.9)$$

em que o volume da bolha, V_b , é igual a $\pi d^3/6$ e a pressão no interior da bolha é definida pela equação (3.1).

A variação do número total de moles na bolha será igual ao número de moles de oxigénio transferido entre a bolha e o líquido, e que é

$$-\frac{dn}{dt} = D_{O_2} 2\pi d \left[\left(P_e + \frac{4\sigma}{d} \right) H_{O_2} - C_{O_2} \right] \quad (3.6.b)$$

uma vez que se está a considerar difusão pura e a bolha é constituída por um só componente.

Se $\left(P_e + \frac{4\sigma}{d}\right)H_{O_2} < C_{O_2}$, a transferência de oxigénio dá-se do líquido para a bolha, aumentando esta de tamanho.

Se $\left(P_e + \frac{4\sigma}{d}\right)H_{O_2} > C_{O_2}$, haverá transferência de oxigénio da bolha para o líquido. A bolha tenderá a diminuir de tamanho, podendo dissolver-se totalmente no líquido.

O caso particular em que a água está saturada em oxigénio, relativamente à pressão P_e ($C_{O_2} = H_{O_2} P_e$), foi já analisado na secção 3.4.2.

Vai aqui analisar-se a situação mais geral, que ainda não foi abordada, em que $C_{O_2} \neq H_{O_2} P_e$. Nestas condições, ao igualar os segundos membros das equações (3.9) e (3.6.b) e separando variáveis, obtém-se

$$dt = -\frac{d^2 P_e / 4 + 2d\sigma / 3}{\mathcal{R} T D_{O_2} \left[\left(P_e H_{O_2} - C_{O_2} \right) d + 4\sigma H_{O_2} \right]} dd \quad (3.26.a)$$

que pode ser integrada analiticamente, entre o diâmetro inicial da bolha, d_0 , e um diâmetro qualquer d . O intervalo de tempo, Δt , correspondente àquela variação do diâmetro da bolha, será então dado por

$$\Delta t = -\left[\frac{a}{2c} (d^2 - d_0^2) + \frac{bc - ae}{c^2} (d - d_0) + \left(\frac{ae^2}{c^3} - \frac{be}{c^2} \right) \ln \frac{cd + e}{cd_0 + e} \right] \quad (3.27.a)$$

com

$$\begin{aligned} a &= P_e / (4\mathcal{R}T), & b &= 2\sigma / (3\mathcal{R}T), \\ c &= D_{O_2} (P_e H_{O_2} - C_{O_2}) & e &= 4\sigma D_{O_2} H_{O_2}. \end{aligned}$$

Para $d = 0$, o tempo calculado pela equação (3.27.a) representará o tempo de colapso da bolha.

No gráfico da figura 4.4, representa-se, a título ilustrativo, a evolução, com o tempo, do tamanho de uma bolha de oxigénio de diâmetro inicial igual a $100\text{ }\mu\text{m}$, imersa em água com oxigénio dissolvido ($C_{O_2} = 32 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, o que corresponde a cerca de 80% da concentração de saturação), a 1 bar e 20°C .

A forma da curva representada na figura 4.4 já é conhecida. Ela é idêntica à das curvas representadas nas figuras 3.4 e 3.5 (secções 3.4.2 e 3.4.3). Se se comparar, no entanto, o tempo de colapso da bolha nas condições da figura 3.4 (água saturada em oxigénio) com o obtido nas condições da figura 4.4 (concentração de oxigénio dissolvido na água equivalente a 80% da saturação), vê-se que o primeiro é cerca de 6 vezes superior ao último. É evidente o efeito da concentração de oxigénio dissolvido na água, na taxa de dissolução da bolha.

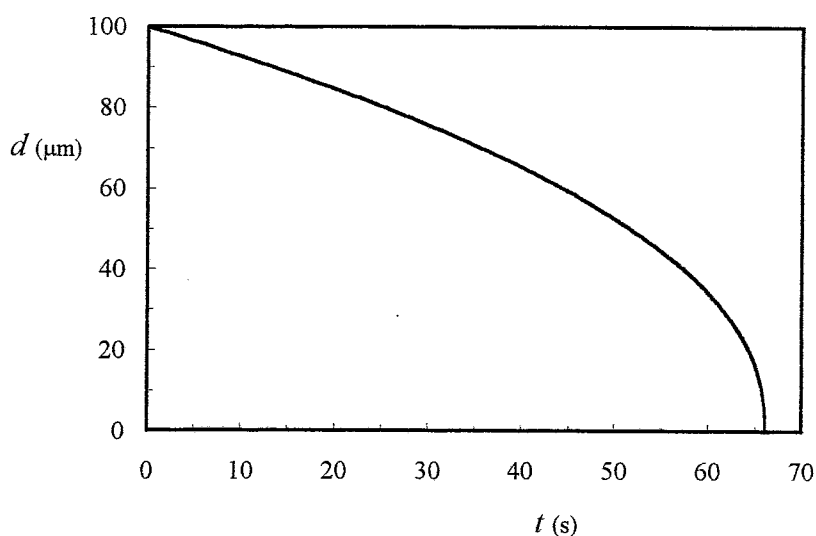


Figura 4.4 - Evolução, com o tempo, do tamanho de uma microbolha de oxigénio, de diâmetro inicial igual a $100\text{ }\mu\text{m}$, imersa em água com oxigénio dissolvido ($C_{O_2} = 32 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$), a 1 bar e a 20°C

No gráfico da figura 4.5 representa-se a fracção de oxigénio dissolvido da bolha, f_{O_2} , relativamente à quantidade inicial de oxigénio na bolha. Nesta situação, como a bolha apenas contém oxigénio e este é (supostamente) o único soluto transferido para a água,

$(1 - f_{O_2})$ representa, em cada instante, a razão entre o número total de moles $(PV_b/(\mathcal{R}T))$, nesse instante, e o número inicial de moles na bolha. A temperatura constante, e representando d o diâmetro da bolha, no instante considerado, e d_0 o seu diâmetro inicial, f_{O_2} será, simplesmente,

$$f_{O_2} = 1 - \frac{\left(P_e + \frac{4\sigma}{d}\right)d^3}{\left(P_e + \frac{4\sigma}{d_0}\right)d_0^3} \quad (4.7)$$

O gráfico da figura 4.5 mostra que a variação de f_{O_2} , com o tempo, é quase linear.

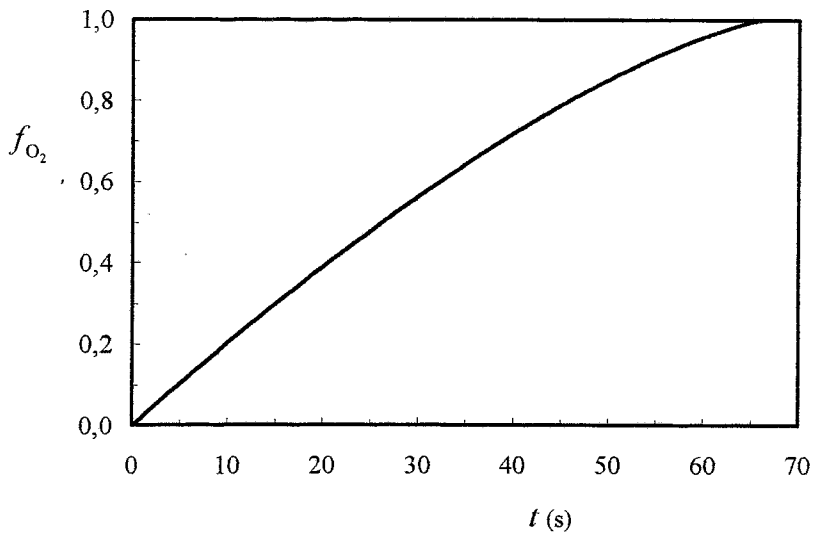


Figura 4.5 - Variação, com o tempo, da fracção de gás dissolvido de uma microbolha de oxigénio, relativamente à quantidade inicial, a 1 bar e a 20°C ($d_0 = 100 \mu\text{m}$, $C_{O_2} = 32 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$)

4.4.3 Microbolhas de gás com vários componentes

Neste trabalho, tem interesse considerar a evolução de uma bolha de oxigénio e azoto, em água com oxigénio e azoto dissolvidos. A equação que define a variação do número total

de moles na bolha, como sendo a soma das taxas molares de transferência de oxigénio e azoto entre a bolha e o líquido, é, considerando difusão pura,

$$-\frac{dn}{dt} = D_{O_2} 2\pi d \left[y_{O_2} \left(P_e + \frac{4\sigma}{d} \right) H_{O_2} - C_{O_2} \right] + D_{N_2} 2\pi d \left[(1 - y_{O_2}) \left(P_e + \frac{4\sigma}{d} \right) H_{N_2} - C_{N_2} \right] \quad (3.16.a)$$

As concentrações de oxigénio e de azoto dissolvidos no líquido, C_{O_2} e C_{N_2} , longe da bolha, consideradas constantes, podem agora tomar um valor qualquer.

Ao igualar os segundos membros das equações (3.16.a) e (3.9), e fazendo $A = (D_{O_2} H_{O_2} y_{O_2} + D_{N_2} H_{N_2} (1 - y_{O_2}))$ e $B = (D_{O_2} C_{O_2} + D_{N_2} C_{N_2})$, obtém-se

$$dt = - \frac{d^2 P_e / 4 + 2d\sigma / 3}{\mathcal{RT}[(P_e A - B)d + 4\sigma A]} dd \quad (3.26)$$

Viu-se, na secção 3.4.3, que esta equação só poderia ser integrada analiticamente se as fracções molares de oxigénio e azoto na bolha fossem invariáveis no tempo, o que não acontece na situação considerada.

No entanto, se se considerarem limites de integração entre dois valores de d suficientemente próximos, pode considerar-se que, no intervalo de tempo correspondente, as fracções molares praticamente não variam.

Veja-se então como resolver o problema. É necessário, num primeiro passo, verificar se a bolha vai começar por diminuir ou aumentar de tamanho. Isso depende do valor da soma das taxas de transferência dos dois componentes, no instante inicial, ser positivo ou negativo, o que é determinado pela composição e tamanho da bolha, e pela concentração dos dois solutos no líquido (equação (3.16.a)). Tendo em conta o sentido de variação de d com t , impõe-se uma variação suficientemente pequena (negativa ou positiva) ao diâmetro da bolha e calcula-se o intervalo de tempo, Δt , em que essa variação ocorre, através da equação (3.26) integrada entre d_1 e $d_{1+\Delta d}$ (dois valores muito próximos do diâmetro da bolha),

$$\Delta t = - \left[\frac{a}{2c} (d_{I+1}^2 - d_I^2) + \frac{bc - ae}{c^2} (d_{I+1} - d_I) + \left(\frac{ae^2}{c^3} - \frac{be}{c^2} \right) \ln \frac{cd_{I+1} + e}{cd_I + e} \right] \quad (3.27)$$

com

$$\begin{aligned} a &= P_e / (4\mathcal{R}T), & b &= 2\sigma / (3\mathcal{R}T), \\ c &= (P_e A - B) & e &= 4\sigma A. \end{aligned}$$

Utilizando o valor de Δt assim calculado e o diâmetro médio ($\bar{d} = (d_{I+1} + d_I)/2$), obtém-se uma boa estimativa do número total de moles de oxigénio e azoto transferidos durante esse intervalo de tempo, fazendo

$$n_{O_2} = D_{O_2} 2\pi \bar{d} \left[y_{O_2} \left(P_e + \frac{4\sigma}{\bar{d}} \right) H_{O_2} - C_{O_2} \right] \Delta t \quad (3.28)$$

e

$$n_{N_2} = D_{N_2} 2\pi \bar{d} \left[(1 - y_{O_2}) \left(P_e + \frac{4\sigma}{\bar{d}} \right) H_{N_2} - C_{N_2} \right] \Delta t \quad (3.29)$$

Se, inicialmente, o número total de moles na bolha for designado por $n(1)$, após o intervalo de tempo Δt , esse número passará a ser

$$n(2) = n(1) - \sum n_i(1) \quad (i = O_2, N_2) \quad (4.8)$$

em que $n_i(1)$ representa o número de moles do soluto i (oxigénio e azoto) transferido durante o intervalo de tempo considerado.

Genericamente, para a iteração I ,

$$n(I+1) = n(I) - \sum n_i(I) \quad (i = O_2, N_2) \quad (4.8.a)$$

A nova fracção molar do componente i vem, então,

$$y_i(I+1) = \frac{[n(I)y_i(I) - n_i(I)]}{n(I+1)} \quad (4.9)$$

Com os novos valores de y_i , é possível verificar a validade da aproximação feita anteriormente, ao admitir aproximadamente constantes as fracções molares dos solutos, no intervalo de tempo considerado. Se necessário, diminui-se o passo de integração. Como critério, aceitou-se uma variação máxima de 0,3% entre dois valores sucessivos das fracções molares.

Pela condição

$$\sum y_i = 1 \quad (4.10)$$

obtém-se directamente a fracção molar do segundo componente na bolha.

Com estes valores, pode retomar-se o cálculo, verificando o sentido do fluxo molar global e prosseguindo com a integração da equação (3.26), para o valor seguinte de d .

Para um maior número de componentes, M , as equações seriam idênticas, calculando-se as fracções de $(M-1)$ componentes por aplicação da equação (4.9) $(M-1)$ vezes, e a fracção do último componente pela equação (4.10).

4.5 APLICAÇÃO DO ALGORITMO A SISTEMAS ESTUDADOS POR OUTROS AUTORES E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Com o objectivo de testar a validade do processo de cálculo anteriormente descrito, foram comparados os resultados obtidos por este algoritmo com os apresentados por outros autores.

Uma abordagem muito semelhante à que aqui foi apresentada é sugerida num trabalho pioneiro sobre a estabilidade de bolhas de gás em líquidos (Epstein e Plesset, 1950). Estes autores consideraram o ar um gás “puro”, com propriedades iguais à média pesada das propriedades do oxigénio (21%) e do azoto (79%). Tal como no presente trabalho, Epstein e Plesset desprezaram igualmente o termo convectivo da equação geral de difusão (equação (3.2)), e foi tido em conta o efeito da tensão superficial. Estes autores analisaram a dissolução de bolhas de ar em água com concentrações de gás dissolvido inferiores aos correspondentes valores de equilíbrio com o ar e também o crescimento de bolhas de ar em água com concentrações de ar dissolvido superiores aos valores de saturação.

Apresentam-se na tabela 4.2 os valores dos tempos, t_1 , de dissolução ou crescimento (até a bolha atingir um diâmetro dez vezes maior do que o diâmetro inicial) de bolhas com diferentes diâmetros iniciais (d_0) e para várias concentrações de ar dissolvido na água (expressas como uma fracção, β , da concentração de equilíbrio). Na mesma tabela indicam-se os valores dos tempos correspondentes (t_2), obtidos pelo algoritmo aqui descrito. Como o ar é considerado um gás “puro”, as equações utilizadas foram as apresentadas na secção 4.4.2, tendo-se resolvido a equação (3.27.a) com as seguintes propriedades “médias” do ar, a 22°C: a constante de proporcionalidade da lei de Henry⁽¹⁾ (para o ar), $8,155 \times 10^{-6}$ mol/(Nm), a difusividade do ar em água, 2×10^{-9} m²/s (Epstein e Plesset, 1950) e o valor da tensão superficial para o sistema ar-água, $72,44 \times 10^{-3}$ N/m (International Critical Tables, vol. 4, p. 447).

Para o caso particular em que a água está saturada ($\beta = 1$), é aplicável a equação (3.14) (secção 3.4.2).

Como se constata pelos valores da tabela 4.2, o algoritmo desenvolvido permite obter valores relativos a tempos de dissolução e crescimento de bolhas praticamente iguais aos obtidos por Epstein e Plesset, como seria de prever, dada a semelhança entre as aproximações feitas.

⁽¹⁾ - lei de Henry, para o ar, expressa sob a forma: $x = HP$, em que x representa a fracção molar de ar no líquido e P a pressão no interior da bolha de ar

Tabela 4.2 - Comparação dos tempos (t_1) de dissolução ou crescimento de bolhas de ar em água obtidos por Epstein e Plesset (1950), com os valores (t_2) obtidos pelo algoritmo apresentado, aplicado às mesmas condições

d_0	d_f	β	t_1	t_2
(μm)	(μm)		(s)	(s)
20	0	0	1,17	1,17
200	0		124	124
2000	0		$1,25 \times 10^4$	$1,25 \times 10^4$
20	0	0,25	1,46	1,46
200	0		164	164
2000	0		$1,66 \times 10^4$	$1,66 \times 10^4$
20	0	0,5	1,96	1,96
200	0		241	241
2000	0		$2,49 \times 10^4$	$2,49 \times 10^4$
20	0	1,0	6,63	6,66
200	0		$5,88 \times 10^3$	$5,91 \times 10^3$
2000	0		$5,8 \times 10^6$	$5,8 \times 10^6$
20	200	1,5	266	266
200	2000		$2,49 \times 10^4$	$2,49 \times 10^4$
20	200	2,0	129	129
200	2000		$1,24 \times 10^4$	$1,24 \times 10^4$
20	200	5,0	31,7	31,7
200	2000		$3,1 \times 10^3$	$3,1 \times 10^3$

Yung e a sua equipa (Yung *et al.*, 1987) apresentaram uma análise mais completa da dissolução de bolhas de gás, contendo um ou mais componentes, tendo em consideração os vários parâmetros que a influenciam - tensão superficial, movimento radial da interface, presença de vapor do líquido ou de gases inertes (não solúveis no líquido) na bolha, sendo utilizado pelos autores um método de diferenças finitas para resolver a equação geral de difusão (equação (3.2)).

Yung e os seus colaboradores estudaram vários sistemas, tendo-se seleccionado, para comparação, o estudo da evolução de uma bolha contendo oxigénio (45,69%), azoto (42,85%) e vapor de água (11,46%), de diâmetro inicial igual a 272 μm , em água contendo oxigénio e azoto dissolvidos em concentrações correspondentes a 93% dos respectivos valores de equilíbrio; esta análise foi feita para a temperatura de 25°C, e pressão exterior no líquido de $2,67 \times 10^{-1}$ bar (200 mmHg).

Os resultados obtidos por Yung *et al.* são apresentados no gráfico da figura 4.6, conjuntamente com os resultados que se obtêm do algoritmo desenvolvido no presente trabalho, para as condições e constantes físicas idênticas às usadas por Yung *et al.*. No seu trabalho, Yung e a sua equipa pretenderam simular os resultados experimentais de Ward e Tucker (1975), que também estão representados no gráfico da figura 4.6.

Para cada valor do diâmetro, os desvios entre os valores obtidos por Yung *et al.* (1987) e os obtidos no presente estudo são sempre inferiores a 5%.

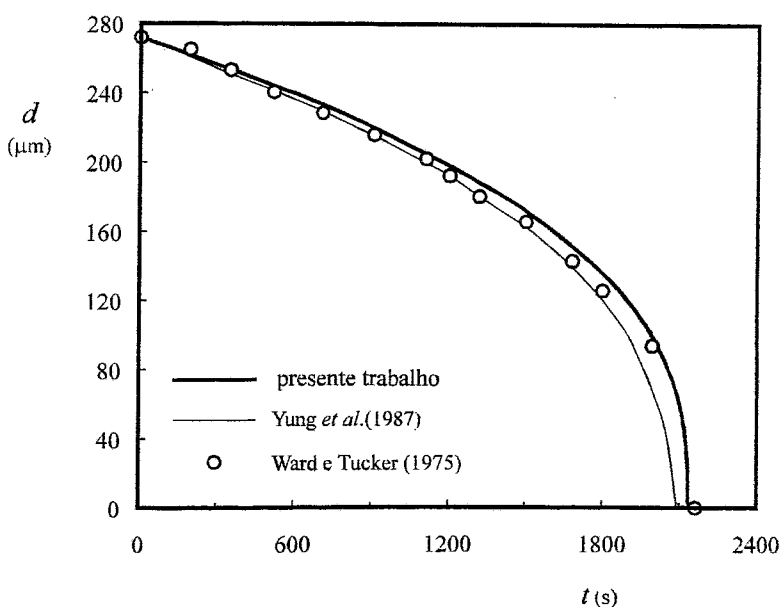


Figura 4.6 - Comparação dos resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido com os resultados previstos por Yung *et al.*, e com os resultados experimentais de Ward e Tucker, para a evolução de uma bolha contendo oxigénio (45,69%), azoto (42,85%) e vapor de água (11,46%), e que está imersa em água com oxigénio e azoto dissolvidos em concentrações correspondentes a 93% dos valores de equilíbrio com o gás

Os valores apresentados parecem justificar a utilização do algoritmo proposto na secção 4.4 para obter uma estimativa dos tempos de dissolução ou crescimento de microbolhas de ar e de azoto, em água.

Na secção seguinte, o algoritmo desenvolvido é utilizado para prever a evolução de microbolhas, de diferentes tamanhos, em condições que simulam as condições experimentais utilizadas no presente trabalho.

4.6 APLICAÇÃO DO ALGORITMO DESENVOLVIDO NA PREVISÃO DA EVOLUÇÃO DE MICROBOLHAS NAS CONDIÇÕES DOS ENSAIOS TIPO A (ABSORÇÃO de O_2) E TIPO C (DESABSORÇÃO de O_2)

4.6.1 Introdução

No presente estudo, interessava analisar a evolução das microbolhas quer no processo de absorção do oxigénio do ar para a água, quer na situação inversa, de desabsorção do oxigénio da água, com azoto. Para isso, as condições de operação traduzidas pelos valores das variáveis T , P_e , C_{O_2} e C_{N_2} , que foram utilizadas no algoritmo desenvolvido, correspondiam às observadas nos ensaios tipo A (absorção) e tipo C (desabsorção). Ou seja, simulou-se a evolução de microbolhas de ar em ensaios tipo A, e de azoto, em ensaios tipo C, à temperatura $T = 25^\circ\text{C}$ e pressão $P_e = 1$ bar.

Em cada ensaio, o valor de C_{O_2} ($\equiv C$, concentração de oxigénio dissolvido na água, à saída do borbulhador principal) era medido, e foi possível utilizar esses valores directamente para a simulação. Já os valores de C_{N_2} , a utilizar na simulação, tiveram que ser estimados, pois a determinação de azoto dissolvido não fazia parte do plano experimental. No Apêndice A.5, mostra-se como é possível obter valores de C_{N_2} que se supõe estarão próximos dos valores que se observariam nas experiências. Os valores obtidos por essa técnica estão indicados na tabela 4.3, que fornece alguns dos dados necessários para a simulação. Os

valores aí apresentados foram medidos durante as experiências ou calculados a partir de valores experimentais, para as condições de operação indicadas nas duas primeiras colunas.

Os valores de β , entre parênteses, sob os valores das concentrações apresentados nas 3^a, 4^a e 6^a colunas da tabela 4.3, representam a fracção daqueles valores relativamente ao valor da solubilidade do oxigénio do ar em água, do azoto do ar em água e do azoto puro em água, respectivamente, à pressão de 1 bar e temperatura de 25°C.

A simulação vai ser feita para microbolhas de ar e de azoto em água, só para alguns dos casos que foram testados experimentalmente. As condições experimentais a que esses casos dizem respeito são $h = 120$ mm e os valores de ϕ e $\dot{V}_g$ apresentados nas duas primeiras colunas da tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Valores experimentais ou estimados das concentrações de oxigénio e azoto dissolvidos na água, para diferentes orifícios e caudais de gás ($h = 120$ mm)

ϕ (mm)	$\dot{V}_g \times 10^6$ (m ³ /s)	Absorção (ensaio tipo A)		Desabsorção (ensaio tipo C)	
		$C \times 10^3$ (kg/m ³)	$C_{N_2} \times 10^3$ (kg/m ³)	$C \times 10^3$ (kg/m ³)	$C_{N_2} \times 10^3$ (kg/m ³)
0,2	5,2	3,8 ($\beta = 0,45$) ⁽¹⁾	16,8 ($\beta = 1,15$) ⁽²⁾	3,8	16,6 ($\beta = 0,89$) ⁽³⁾
	8,0	5,0 ($\beta = 0,59$)	16,3 ($\beta = 1,12$)	3,5	16,7 ($\beta = 0,90$)
0,3	5,0	3,7 ($\beta = 0,44$)	16,8 ($\beta = 1,15$)	4,6	16,2 ($\beta = 0,87$)
	20	5,5 ($\beta = 0,65$)	16,0 ($\beta = 1,10$)	2,9	17,0 ($\beta = 0,91$)
3,0	20	4,8 ($\beta = 0,57$)	16,3 ($\beta = 1,12$)	4,4	16,3 ($\beta = 0,87$)
	48	6,0 ($\beta = 0,71$)	15,8 ($\beta = 1,08$)	3,0	17,0 ($\beta = 0,91$)

⁽¹⁾ valor da solubilidade do oxigénio do ar em água (1 bar, 25°C): $8,4 \times 10^{-3}$ kg/m³,

⁽²⁾ valor da solubilidade do azoto do ar em água (1 bar, 25°C): $14,6 \times 10^{-3}$ kg/m³ e

⁽³⁾ valor da solubilidade do azoto puro em água (1 bar, 25°C): $18,6 \times 10^{-3}$ kg/m³ (Intern. Critical Tables, vol. 3, pp. 256, 257)

4.6.2 Resultados da simulação

Foi feita a simulação numérica da evolução de microbolhas de diferentes diâmetros iniciais ($d_0 \leq 100 \mu\text{m}$), para os diferentes valores de C ($\equiv C_{\text{O}_2}$) e C_{N_2} indicados na tabela 4.3. Para a evolução de microbolhas de ar, os valores usados das concentrações de oxigénio e azoto dissolvidos na água, longe da bolha, foram os das 3ª e 4ª colunas. Para a evolução de microbolhas de azoto, usaram-se os valores das concentrações de oxigénio e azoto dissolvidos na água, longe da bolha, que estão representados nas 5ª e 6ª colunas da tabela 4.3.

Apresentam-se, seguidamente, os resultados da simulação da evolução de *i*) microbolhas de ar em água, em ensaios de absorção, e *ii*) microbolhas de azoto em água, em ensaios de desabsorção. Em qualquer dos casos, a tensão superficial (σ) do sistema (ar-água, a 25°C) foi considerada igual a $72 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ (International Critical Tables, vol. 4, p. 447).

i) Simulação da evolução de microbolhas de ar em água, em ensaios de absorção (tipo A)

Tal como é possível constatar pelos valores apresentados na tabela 4.3, nos ensaios de absorção, a concentração média de oxigénio dissolvido na água (C), no borbulhador principal, é (obviamente) inferior à concentração de equilíbrio com o ar ($C_{\text{O}_2}^*$). A concentração média de azoto dissolvido na água (C_{N_2}), por sua vez, é superior à respectiva concentração de equilíbrio com o ar ($C_{\text{N}_2}^*$), já que a água “provém” de outra coluna onde se procede ao *stripping* do oxigénio da água com azoto puro.

Apresentam-se aqui, em pormenor (figuras 4.7 a 4.9), os resultados da simulação da evolução de microbolhas de ar, de diferentes tamanhos iniciais no seio de água com concentrações médias de oxigénio e azoto dissolvidos (longe da bolha) de $3,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ e $16,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, respectivamente (correspondentes às condições dos ensaios tipo A, para $\phi = 0,2 \text{ mm}$ e $\dot{V}_g = 5,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$).

As figuras 4.7, 4.8 e 4.9 correspondem a diferentes tamanhos iniciais da bolha ($d_0 = 100, 60$ e $20 \mu\text{m}$, respectivamente) e, em cada uma delas, representa-se a variação, com o tempo, de

(a) d ,

(b) $C_{\text{O}_2}^*$,

(c) $C_{\text{N}_2}^*$ e

(d) f_{O_2} . A variável f_{O_2} representa, para um dado instante, a razão entre a quantidade de oxigénio perdida pela bolha desde o início até esse instante, e a quantidade inicial de oxigénio na bolha.

A figura 4.7(a), que mostra a evolução do tamanho da bolha, é idêntica às figuras 3.4 e 4.4, obtidas para gás puro, o que evidencia que o modo como o tamanho da bolha varia é condicionado pela tensão superficial. A taxa de variação do diâmetro da bolha é crescente, ao longo do tempo, e aumenta ainda mais, perto do “fim”, o que é semelhante ao que se passa com uma bolha de gás puro.

Na figura 4.7(b) representa-se a variação do teor de oxigénio no interior da bolha medido em termos da concentração de oxigénio que, no líquido, estaria em equilíbrio com a pressão parcial de oxigénio na bolha ($C_{\text{O}_2}^*$). Representa-se, também, o valor da concentração de oxigénio dissolvido na água, C_{O_2} , longe da bolha, que é um valor constante. A figura 4.7(c) é equivalente à figura 4.7(b), mas para o azoto. Observando os gráficos (b) e (c) da figura 4.7, verifica-se que, para o instante inicial ($t = 0$), $C_{\text{O}_2}^* > C_{\text{O}_2}$ e $C_{\text{N}_2}^* < C_{\text{N}_2}$. Conclui-se, portanto, que a bolha se encontrava com excesso de oxigénio e “carente” em azoto. Na figura 4.7(b), observa-se, ainda, que, após uma variação inicial acentuada de $C_{\text{O}_2}^*$, se atinge uma situação aparentemente estacionária. Note-se, no entanto, que apesar das linhas $C_{\text{O}_2}^*(t)$ e $C_{\text{O}_2}(t)$ parecerem coincidentes, para $t = 400$ segundos, por exemplo, os respectivos valores são $3,85 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ e $3,80 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Também na figura 4.7(c), para o azoto, se regista, para o mesmo tempo (400 segundos), $C_{\text{N}_2}^* = 16,77 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ e $C_{\text{N}_2} = 17,33 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$.

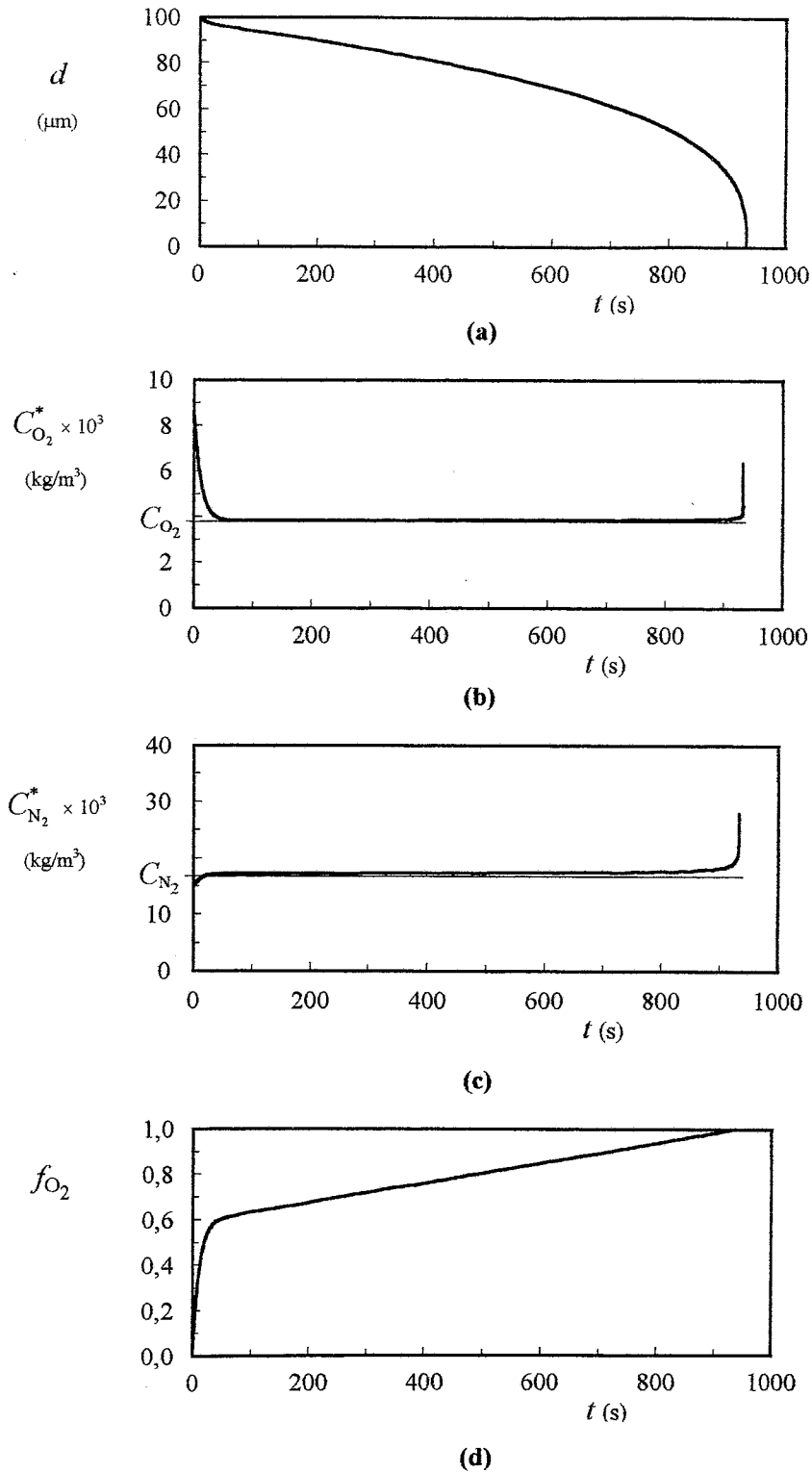


Figura 4.7 - Evolução de uma microbolha de ar de **diâmetro inicial 100 μm** , em água com $3,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de oxigénio e $16,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de azoto dissolvidos; **(a)** - diâmetro da bolha; **(b)** - concentração de oxigénio na água em equilíbrio com a pressão parcial de oxigénio na bolha; **(c)** - concentração de azoto na água em equilíbrio com a pressão parcial de azoto na bolha; **(d)** - fracção do oxigénio perdido pela bolha (massa inicial de O_2 na bolha = $1,461 \times 10^{-13} \text{ kg}$)

Observe-se agora a figura 4.7(d). Se se comparar a figura 4.7(d) com a figura 4.5, que representa, igualmente, a variação de f_{O_2} com o tempo, mas para uma bolha de gás puro (oxigénio), observa-se uma diferença nítida. Enquanto que, para gás puro, a variação de f_{O_2} é gradual, podendo dizer-se que a taxa de dissolução de oxigénio é quase constante ao longo do tempo, na figura 4.7(d) vê-se que mais de metade do oxigénio da bolha é dissolvido num curto intervalo de tempo, quando comparado com o tempo de “desaparecimento” da bolha.

O período inicial em que f_{O_2} aumenta rapidamente, corresponde ao tempo de “ajuste” da fracção molar de oxigénio (e de azoto) ao(s) valor(es) de “equilíbrio” com o líquido, e em que o efeito da tensão superficial é menos importante.

Estabilizados os valores das fracções molares de oxigénio e azoto na bolha, a dissolução desta prossegue a uma taxa mais reduzida e praticamente constante até ao colapso da bolha. Nesta fase, a tensão superficial passa a ser a única “impulsionadora” do processo de dissolução da bolha. De facto, como o tamanho da bolha está a diminuir, o termo da tensão superficial ($4\sigma/d$) aumenta continuamente, tornando a pressão no interior da bolha ($P = P_e + 4\sigma/d$) cada vez mais elevada. As pressões parciais de oxigénio e azoto na bolha e, consequentemente, os valores de $C_{O_2}^*$ e $C_{N_2}^*$ aumentam proporcionalmente, garantindo assim que a bolha continue a dissolver-se. Na ausência da tensão superficial, atingir-se-ia uma situação de equilíbrio, no momento em que as fracções molares de oxigénio e azoto na bolha estabilizassem.

Na fase final de dissolução da bolha, uma vez que o termo da tensão superficial ($4\sigma/d$), e consequentemente a pressão no interior da bolha, aumentam muito rapidamente, os valores de $C_{O_2}^*$ e $C_{N_2}^*$ afastam-se significativamente dos valores de C_{O_2} e C_{N_2} , o que vai acelerar o colapso da bolha.

Os gráficos das figuras 4.8 e 4.9 dizem respeito à evolução de microbolhas de ar de 60 e 20 μm de diâmetro inicial, respectivamente, em água, nas mesmas condições que as consideradas para a figura 4.7.

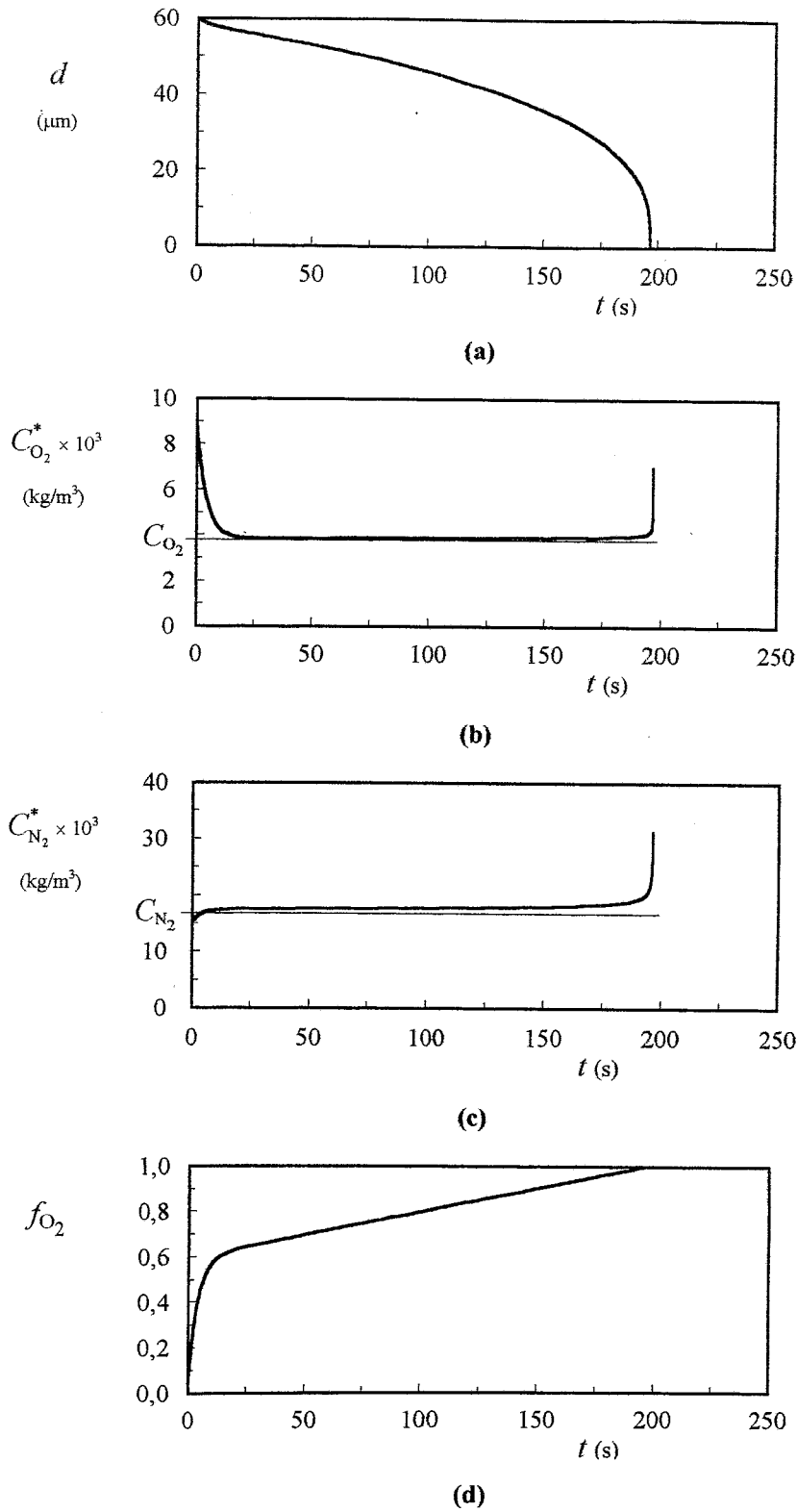


Figura 4.8 - Evolução de uma microbolha de ar de **diâmetro inicial 60 μm** , em água com $3,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de oxigénio e $16,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de azoto dissolvidos; (a) - diâmetro da bolha; (b) - concentração de oxigénio na água em equilíbrio com a pressão parcial de oxigénio na bolha; (c) - concentração de azoto na água em equilíbrio com a pressão parcial de azoto na bolha; (d) - fracção do oxigénio perdido pela bolha (massa inicial de O_2 na bolha = $3,215 \times 10^{-14} \text{ kg}$)

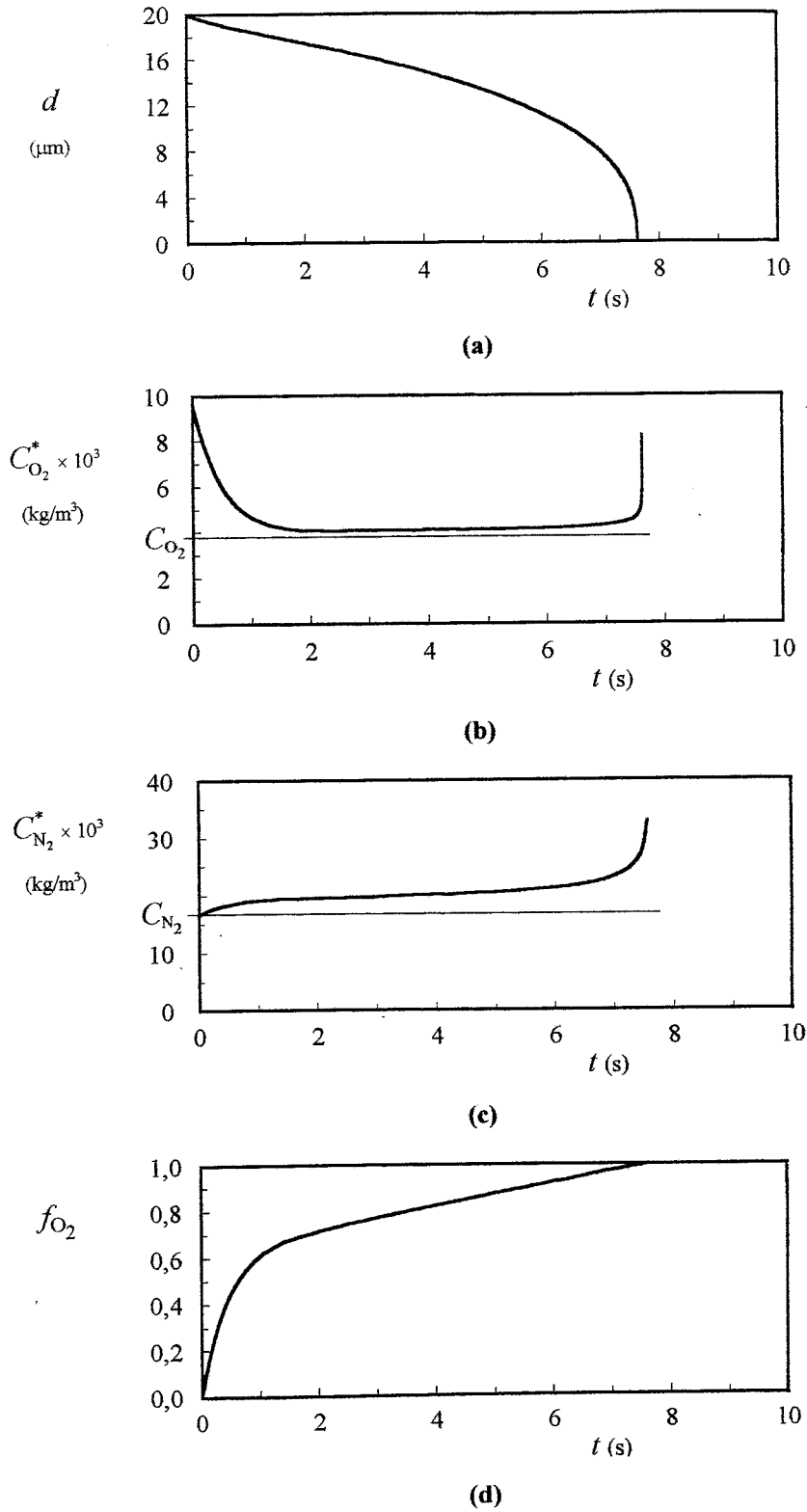


Figura 4.9 - Evolução de uma microbolha de ar de **diâmetro inicial 20 μm** , em água com $3,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de oxigénio e $16,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de azoto dissolvidos; **(a)** - diâmetro da bolha; **(b)** - concentração de oxigénio na água em equilíbrio com a pressão parcial de oxigénio na bolha; **(c)** - concentração de azoto na água em equilíbrio com a pressão parcial de azoto na bolha; **(d)** - fracção do oxigénio perdido pela bolha (massa inicial de O_2 na bolha = $1,300 \times 10^{-15} \text{ kg}$)

É importante notar que as escalas de tempo dos gráficos das figuras 4.8 e 4.9 estão alargadas, relativamente à dos gráficos da figura 4.7. Efectivamente, a bolha de 20 μm não chega aos 8 segundos de vida. Para os outros dois tamanhos considerados, 100 e 60 μm , pode observar-se que, em particular, as curvas $C_{\text{O}_2}^*(t)$ e $C_{\text{N}_2}^*(t)$, correspondentes aos últimos 100 segundos de “vida”, são idênticas, independentemente do tamanho inicial da bolha.

É visível, pelos gráficos das figuras 4.7, 4.8 e 4.9 o efeito cada vez mais dominante da tensão superficial, à medida que se vão considerando bolhas de tamanho mais pequeno. Para as bolhas de 20 μm de diâmetro, por exemplo, verifica-se, inclusivamente, que, dado o valor inicial da pressão no interior da bolha, $C_{\text{N}_2}^*$ ($16,67 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$) é já, nessa altura, tão próximo do valor de C_{N_2} ($16,77 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$), que a bolha começa, praticamente desde o início, a “perder” os dois solutos (oxigénio e azoto) para a água.

Os resultados obtidos para as restantes condições experimentais da tabela 4.3, caracterizadas por diferentes concentrações de oxigénio e azoto dissolvidos na água, revelam tendências idênticas. Os tempos de dissolução total de microbolhas de igual diâmetro inicial são muito próximos, diferindo, no máximo, de 15% (microbolhas de diâmetro inicial de 100 μm). Como a evolução do tamanho das bolhas, com o tempo, é idêntica à apresentada nas figuras 4.7 a 4.9, (gráficos (a)), omitiu-se a sua representação gráfica. Os gráficos com a representação das curvas $C_{\text{O}_2}^*(t)$ e $C_{\text{N}_2}^*(t)$, para as restantes condições, são também semelhantes aos gráficos (b) e (c) das figuras 4.7 a 4.9.

Nos gráficos das figuras 4.10, 4.11 e 4.12 representa-se, para bolhas de ar de diâmetro inicial igual a 100, 60 e 20 μm , respectivamente, e para todas as condições experimentais da tabela 4.3, a variação, com o tempo, de f_{O_2} . Este parâmetro permitirá, posteriormente, quantificar a contribuição da dissolução das microbolhas na taxa global de transferência de oxigénio.

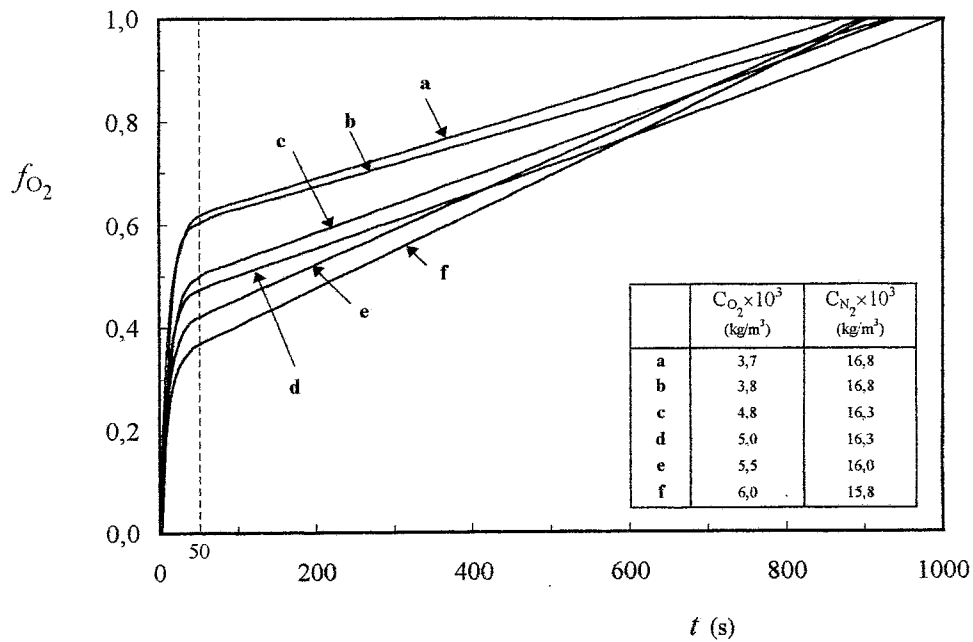


Figura 4.10 - Evolução, com o tempo, da fracção de oxigénio perdido por uma microbolha de ar de diâmetro inicial igual a 100 μm (massa inicial de O_2 na bolha = $1,461 \times 10^{-13}$ kg), quando imersa em água, para diferentes concentrações de oxigénio e azoto dissolvidos

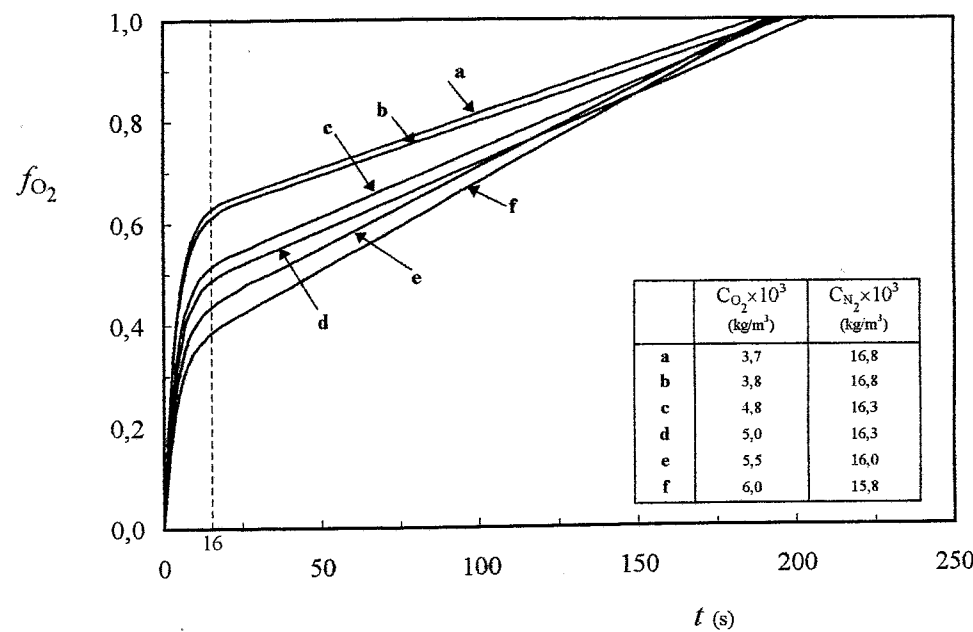


Figura 4.11 - Evolução, com o tempo, da fracção de oxigénio perdido por uma microbolha de ar de diâmetro inicial igual a 60 μm (massa inicial de O_2 na bolha = $3,215 \times 10^{-14}$ kg), quando imersa em água, para diferentes concentrações de oxigénio e azoto dissolvidos

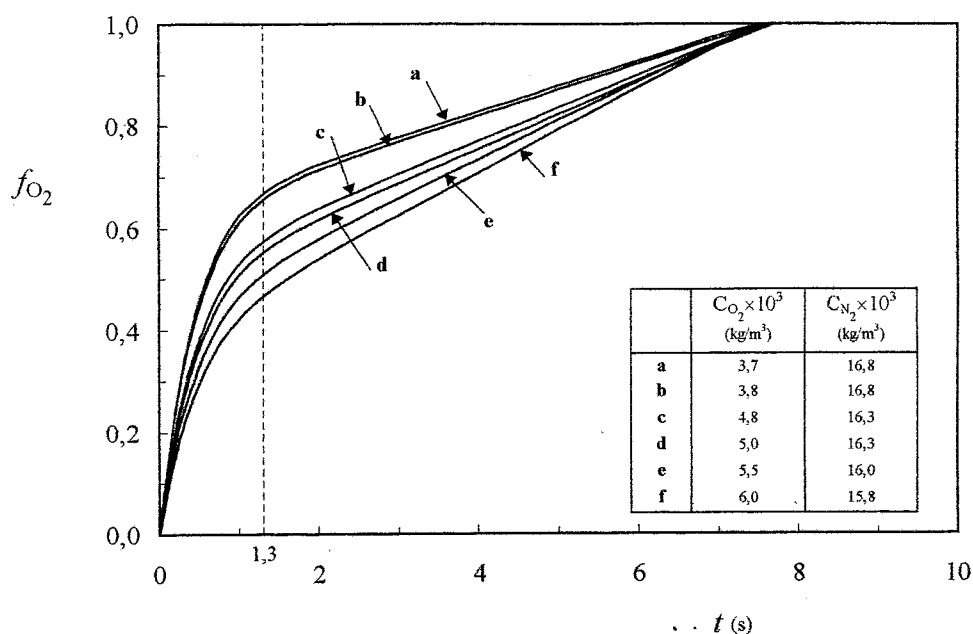


Figura 4.12 - Evolução, com o tempo, da fracção de oxigénio perdido por uma microbolha de ar de diâmetro inicial igual a 20 μm (massa inicial de O_2 na bolha = $1,300 \times 10^{-15}$ kg), quando imersa em água, para diferentes concentrações de oxigénio e azoto dissolvidos

Em todos os gráficos das figuras 4.10 a 4.12 observa-se um comportamento idêntico da variação de f_{O_2} com o tempo. Regista-se, para todas as condições experimentais e todos os tamanhos de bolhas considerados, a existência de duas zonas, bem demarcadas, no intervalo de tempo em que ocorre a dissolução da bolha. Uma primeira zona, à esquerda, nos três gráficos, é caracterizada por uma rápida ascensão de f_{O_2} (correspondente à estabilização das fracções molares de solutos na bolha e em que a tensão superficial é menos importante). A segunda zona (à direita da linha vertical representada nos gráficos, a tracejada) corresponde à fase em que a dissolução da bolha passa a ser “comandada” pela tensão superficial, ocorrendo a uma taxa mais reduzida e praticamente constante até ao colapso da bolha.

Verifica-se ainda, conforme seria previsível, que o valor de f_{O_2} , na altura em que a dissolução passa a ser “conduzida” pela tensão superficial, é tanto maior quanto menor o valor da concentração média de oxigénio dissolvido na água.

ii) Simulação da evolução de microbolhas de azoto em água, em ensaios de desabsorção (tipo C)

Nas figuras 4.13 a 4.15 está representada a evolução de microbolhas de azoto com diferentes tamanhos iniciais, em água, com concentrações médias de oxigénio e azoto dissolvidos (longe da bolha) de $3,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ e $16,6 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ (correspondentes às condições dos ensaios tipo C, para $\phi = 0,2 \text{ mm}$ e $\dot{V}_g = 5,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$). Salienta-se, de novo, que estes resultados são representativos da generalidade dos resultados obtidos para todas as condições experimentais consideradas (tabela 4.3).

As figuras 4.13, 4.14 e 4.15, correspondem a diferentes tamanhos iniciais da bolha ($d_0 = 100, 60$ e $20 \text{ }\mu\text{m}$, respectivamente), e, em cada uma dessas figuras, representa-se a variação, com o tempo, de

(a) d ,

(b) $C_{\text{O}_2}^*$,

(c) $C_{\text{N}_2}^*$ e

(d) f'_{O_2} . A variável f'_{O_2} representa, agora, para um dado instante, a razão entre a quantidade de oxigénio ganho pela bolha, desde o início até esse instante, e a quantidade de oxigénio existente numa bolha de ar, de tamanho igual ao tamanho inicial da bolha de azoto.

Analisar-se-á com mais detalhe a figura 4.13, uma vez que as outras duas figuras (figuras 4.14 e 4.15) são formalmente semelhantes.

A evolução do tamanho das microbolhas, inicialmente de azoto, (figura 4.13(a)) é muito semelhante à evolução do tamanho das bolhas de ar, apresentada anteriormente. Regista-se apenas uma pequena diferença, num curto período inicial, em que a bolha começa por aumentar ligeiramente de tamanho. Após esses escassos segundos, no entanto, ela começa a diminuir de tamanho, prosseguindo o processo de dissolução, até ao colapso da bolha, de forma idêntica à das bolhas de ar. Explica-se, seguidamente, o porquê desta evolução.

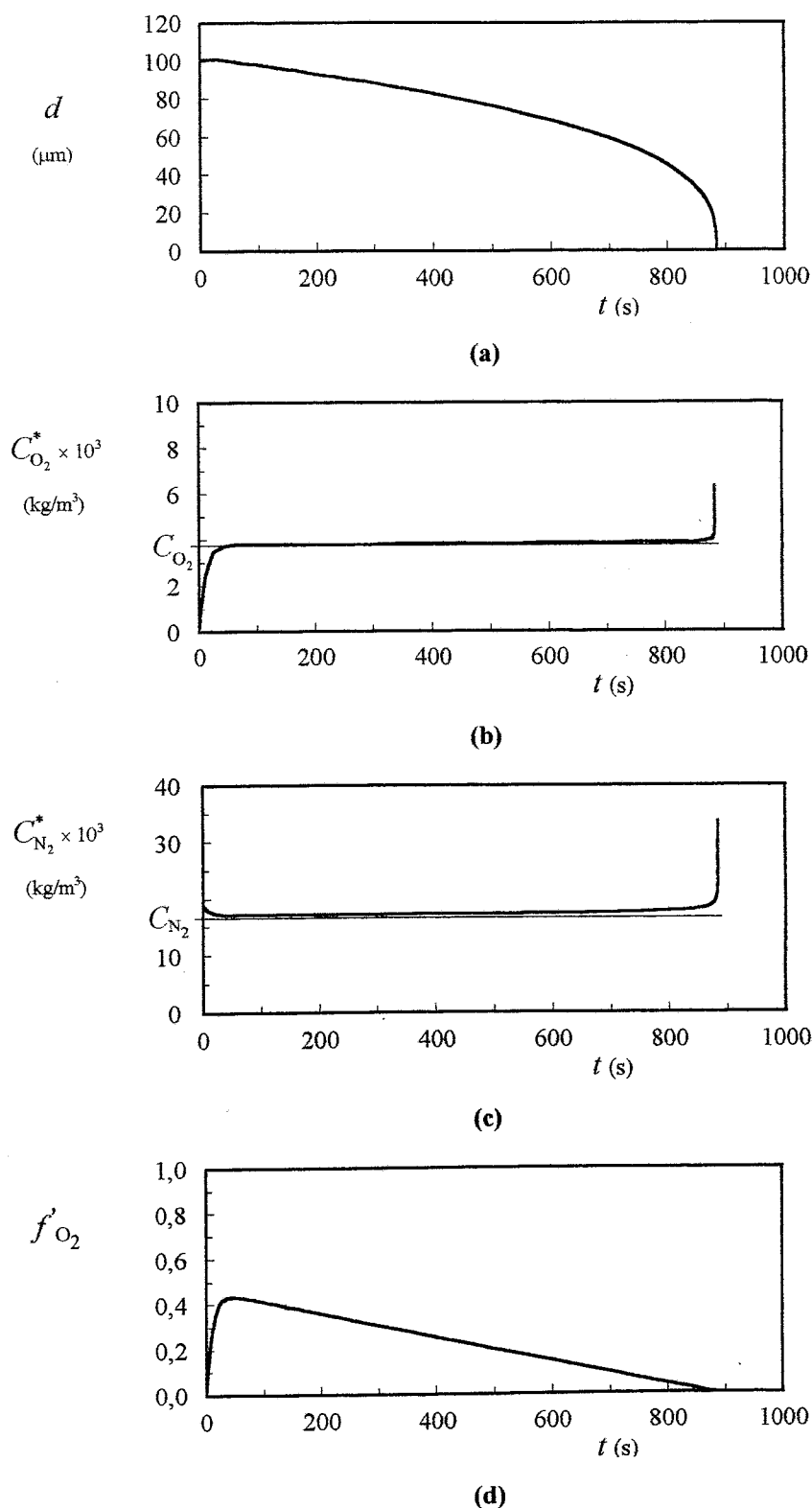


Figura 4.13 - Evolução de uma microbolha de azoto de **diâmetro inicial 100 μm** , em água com $3,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de oxigénio e $16,6 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de azoto dissolvidos; **(a)** - diâmetro da bolha; **(b)** - concentração de oxigénio na água em equilíbrio com a pressão parcial de oxigénio na bolha; **(c)** - concentração de azoto na água em equilíbrio com a pressão parcial de azoto na bolha; **(d)** - razão entre o oxigénio ganho pela bolha e a massa de O_2 numa bolha de ar de $100 \mu\text{m}$ ($1,461 \times 10^{-13} \text{ kg}$)

A bolha, inicialmente de azoto puro, está imersa em água com oxigénio e azoto dissolvidos. Como, no início, a concentração média de azoto dissolvido na água ($C_{N_2}=16,6\times 10^{-3}\text{kg/m}^3$) é inferior à respectiva concentração de equilíbrio com a bolha ($C_{N_2}^* = 18,9\times 10^{-3}\text{kg/m}^3$), ocorre transferência de azoto, da bolha para a água, e de oxigénio, da água para a bolha.

A força directriz para a transferência de oxigénio e o respectivo coeficiente de transferência são superiores aos verificados para o azoto, pelo que a taxa de transferência de oxigénio para a bolha é mais elevada do que a taxa de saída de azoto da bolha. Nestas condições, a bolha começa por aumentar de tamanho. Com a entrada de oxigénio e a saída de azoto da bolha, $C_{O_2}^*$ aumenta e $C_{N_2}^*$ diminui, aproximando-se dos valores de C_{O_2} e C_{N_2} , respectivamente (figuras 4.13(b) e (c)).

Há um momento (por volta dos 20 segundos) em que as taxas de desabsorção (de oxigénio) e de absorção (de azoto) se igualam, numericamente. A bolha começa, a partir daí, a diminuir de tamanho, pois a taxa de saída de azoto torna-se superior à de entrada de oxigénio na bolha.

A saída contínua de azoto da bolha permite que, numa dada altura (aos 50 segundos, sensivelmente), a pressão parcial de oxigénio na bolha ultrapasse o valor de equilíbrio com C_{O_2} . A partir desse instante, a bolha passa a transferir, também, oxigénio para a água, prosseguindo a dissolução da bolha de forma idêntica à observada para as bolhas de ar.

A fase que se segue é, também aqui, definitivamente controlada pelo efeito da tensão superficial. Devido à diminuição do diâmetro da bolha, o termo da tensão superficial ($4\sigma/d$) faz aumentar continuamente a pressão no interior da bolha. Consequentemente, e contrariando a aparente situação de equilíbrio, os valores de $C_{O_2}^*$ e $C_{N_2}^*$ vão-se afastando cada vez mais de C_{O_2} e C_{N_2} , respectivamente. O efeito da tensão superficial garante, desta forma, que a dissolução da bolha prossiga, até ao seu colapso.

O gráfico da figura 4.13(d) é, aparentemente, o mais distinto, relativamente aos gráficos correspondentes apresentados para as microbolhas de ar, devido à inversão da variação de f'_{O_2} , no momento em que a bolha começa a “perder” oxigénio. A curva $f'_{O_2}(t)$

tem, no entanto, um comportamento algo similar à curva $f_{O_2}(t)$. Num período inicial, muito curto, até ocorrer a inversão do fluxo de oxigénio, f'_{O_2} aumenta rapidamente, pois a taxa de transferência de oxigénio para a bolha é elevada. Verifica-se que a quantidade de oxigénio transferida para a bolha durante esse intervalo de tempo é equivalente a perto de metade da massa de oxigénio existente numa bolha de ar de 100 μm . Esta primeira fase é determinada pela variação das fracções molares dos solutos na bolha, que tendem a aproximar-se dos valores de “equilíbrio” com o líquido, tal como acontecia no processo de dissolução das microbolhas de ar. O valor máximo de f'_{O_2} , a partir do qual a bolha começa a “perder” o seu oxigénio para a água, delimita, como se pode ver, duas zonas distintas. A zona da direita corresponde, mais uma vez, à fase em que a dissolução da bolha se dá exclusivamente devido ao efeito da tensão superficial. Nesta (segunda) fase, estabelece-se uma taxa de variação de f'_{O_2} , com o tempo, praticamente constante até ao colapso da bolha. Em valor absoluto, essa taxa é mais reduzida do que a que se verifica durante o período inicial, tal como acontecia com as microbolhas de ar.

Este mesmo comportamento pode ser observado nos gráficos (d) das figuras 4.14 e 4.15, relativas a microbolhas de azoto de 60 e 20 μm de diâmetro, respectivamente, nas mesmas condições que as consideradas na figura 4.13.

É mais uma vez visível, nos gráficos das figuras 4.13, 4.14 e 4.15, o efeito crescente da tensão superficial para bolhas de menor tamanho.

Pode observar-se que (devido ao efeito da tensão superficial na pressão interna da bolha) o valor inicial de $C_{N_2}^*$ é tanto mais elevado quanto menor o diâmetro inicial da bolha. Para a bolha de 20 μm (figura 4.15), verifica-se mesmo que, dado o valor inicial de $C_{N_2}^*$, a taxa de transferência de azoto, da bolha para a água, é, logo no início, superior à taxa de entrada de oxigénio na bolha. Por esse motivo, a bolha diminui de tamanho, desde o instante inicial (figura 4.15(a)).

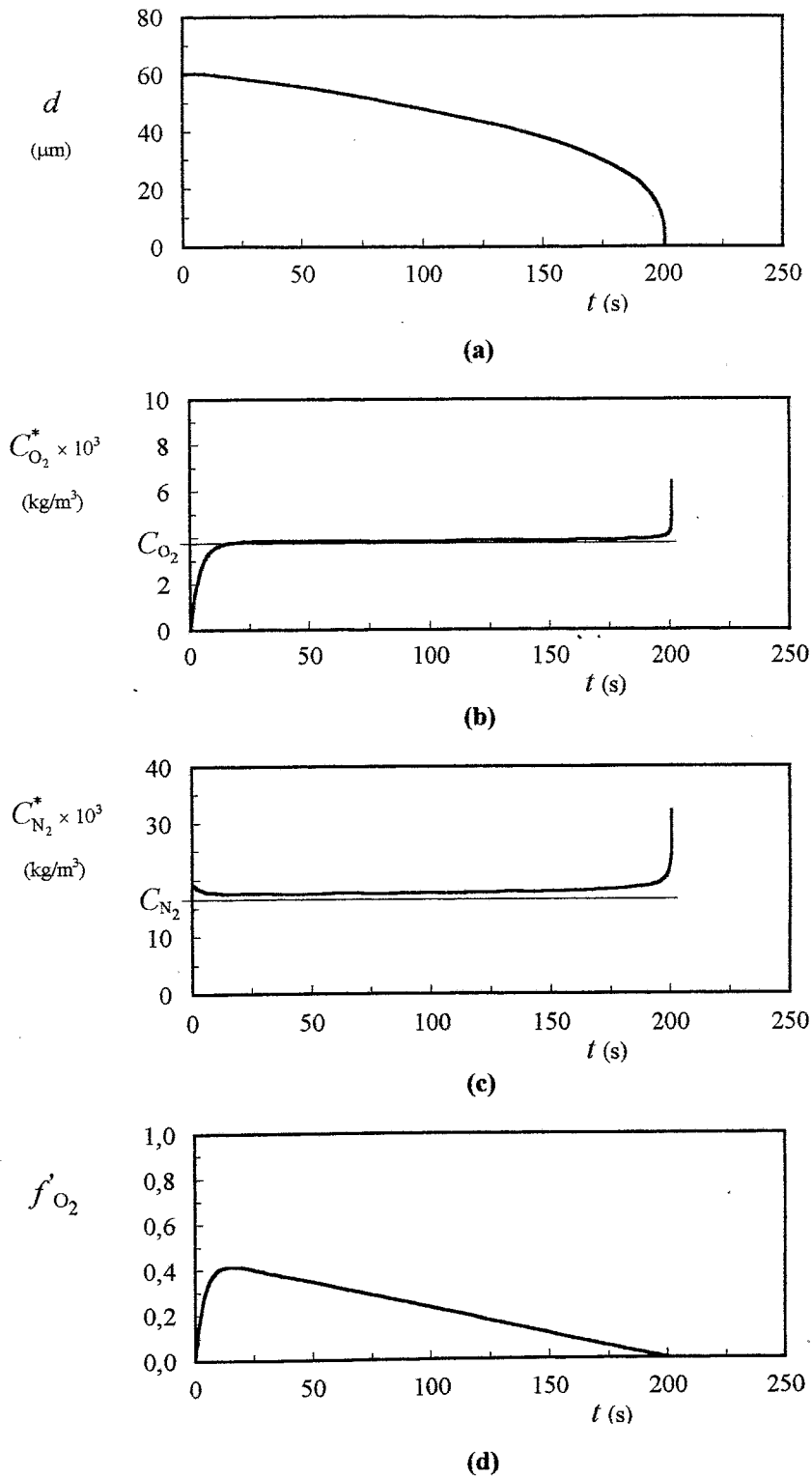


Figura 4.14 - Evolução de uma microbolha de azoto de **diâmetro inicial 60 μm** , em água com $3,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de oxigénio e $16,6 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de azoto dissolvidos; (a) - diâmetro da bolha; (b) - concentração de oxigénio na água em equilíbrio com a pressão parcial de oxigénio na bolha; (c) - concentração de azoto na água em equilíbrio com a pressão parcial de azoto na bolha; (d) - razão entre o oxigénio ganho pela bolha e a massa de O_2 numa bolha de ar de $60 \mu\text{m}$ ($3,215 \times 10^{-14} \text{ kg}$)

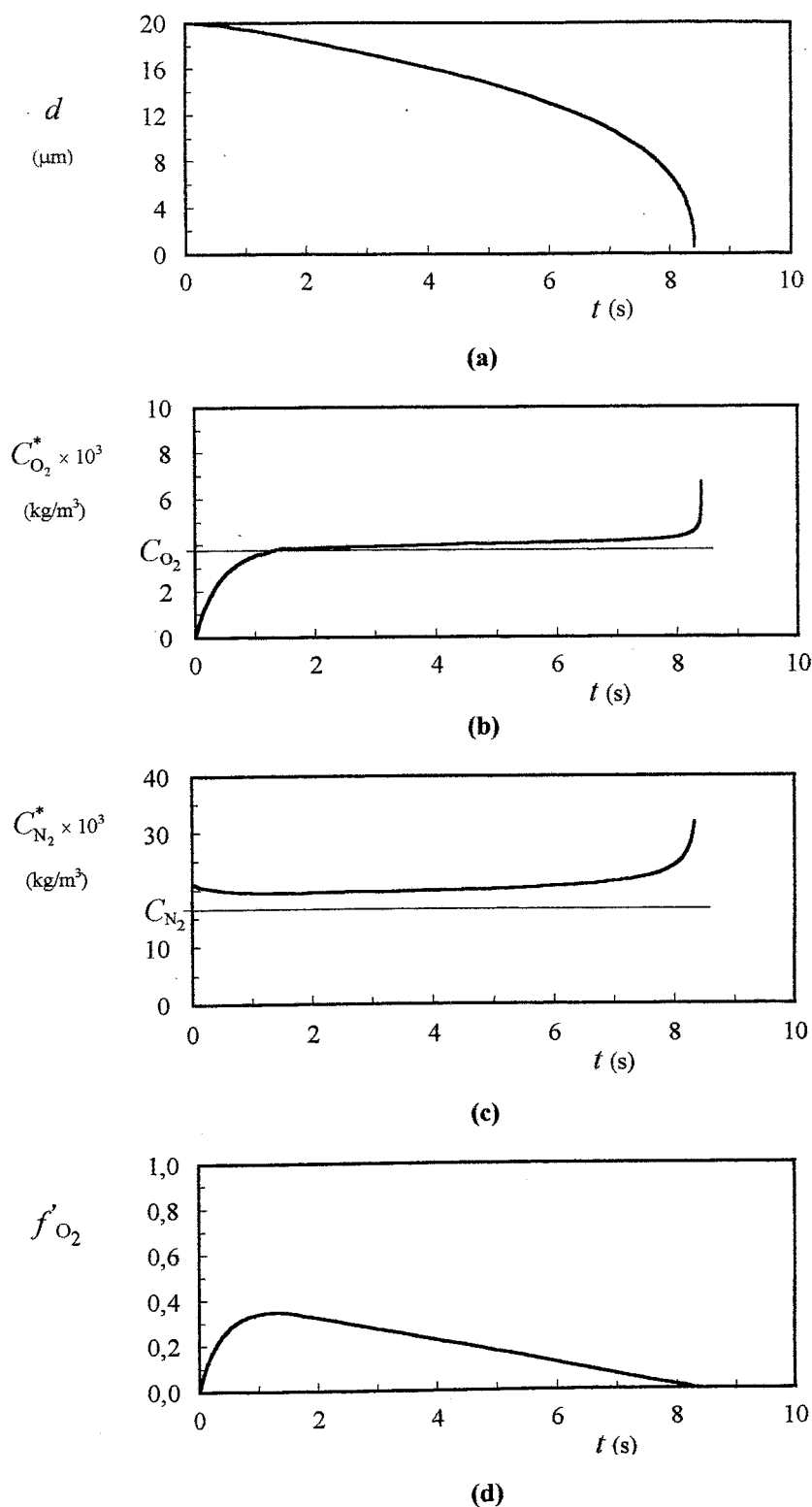


Figura 4.15 - Evolução de uma microbolha de azoto de **diâmetro inicial $20\ \mu\text{m}$** , em água com $3,8 \times 10^{-3}\ \text{kg/m}^3$ de oxigénio e $16,6 \times 10^{-3}\ \text{kg/m}^3$ de azoto dissolvidos; **(a)** - diâmetro da bolha; **(b)** - concentração de oxigénio na água em equilíbrio com a pressão parcial de oxigénio na bolha; **(c)** - concentração de azoto na água em equilíbrio com a pressão parcial de azoto na bolha; **(d)** - razão entre o oxigénio ganho pela bolha e a massa de O_2 numa bolha de ar de $20\ \mu\text{m}$ ($1,300 \times 10^{-15}\ \text{kg}$)

Apresenta-se, nos gráficos das figuras 4.16, 4.17 e 4.18, a variação de f'_{O_2} , com o tempo, para microbolhas de azoto com diâmetro inicial de 100, 60 e 20 μm , respectivamente, para todas as condições experimentais da tabela 4.3 (ensaio de desabsorção, tipo C).

As curvas identificadas, nos três gráficos, pela mesma letra, dizem respeito às mesmas condições operatórias (diâmetro do orifício e caudal de gás). Além disso, as curvas identificadas por uma dada letra, nos gráficos das figuras 4.16, 4.17 e 4.18 (*desabsorção*), correspondem, também, às mesmas condições operatórias (diâmetro do orifício e caudal de gás) que as curvas identificadas pela mesma letra, nos gráficos das figuras 4.10, 4.11 e 4.12 (*absorção*). Esta correspondência permitirá, posteriormente, estabelecer comparações, de uma forma mais simples, entre os dois grupos de resultados.

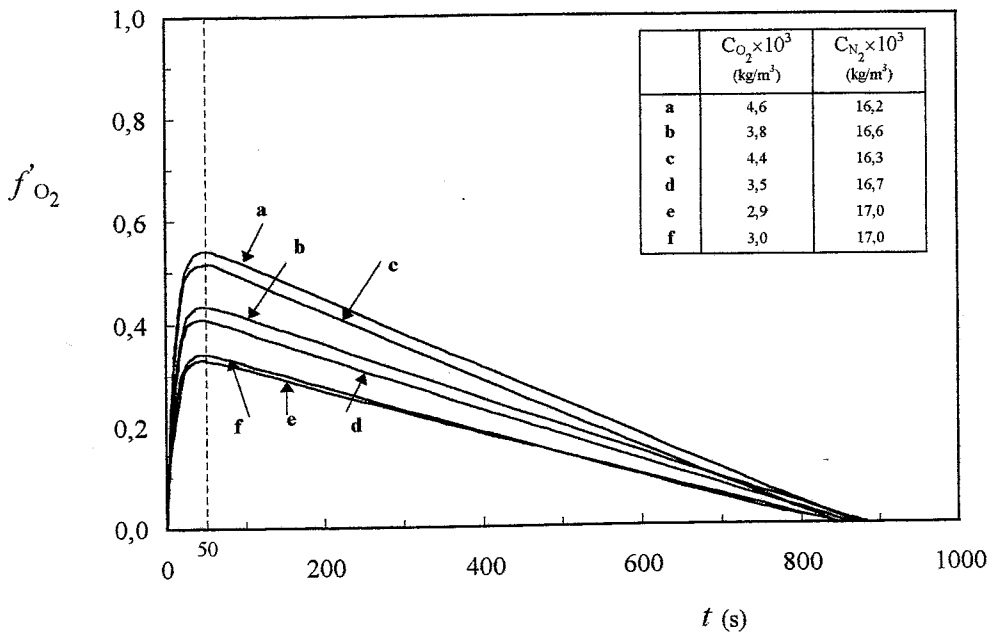


Figura 4.16 - Evolução, com o tempo, da fracção de oxigénio ganho por uma microbolha de azoto de diâmetro inicial igual a 100 μm , relativamente à massa de oxigénio existente numa bolha de ar com diâmetro de 100 μm ($1,461 \times 10^{-13}$ kg), para diferentes concentrações de oxigénio e azoto dissolvidos na água

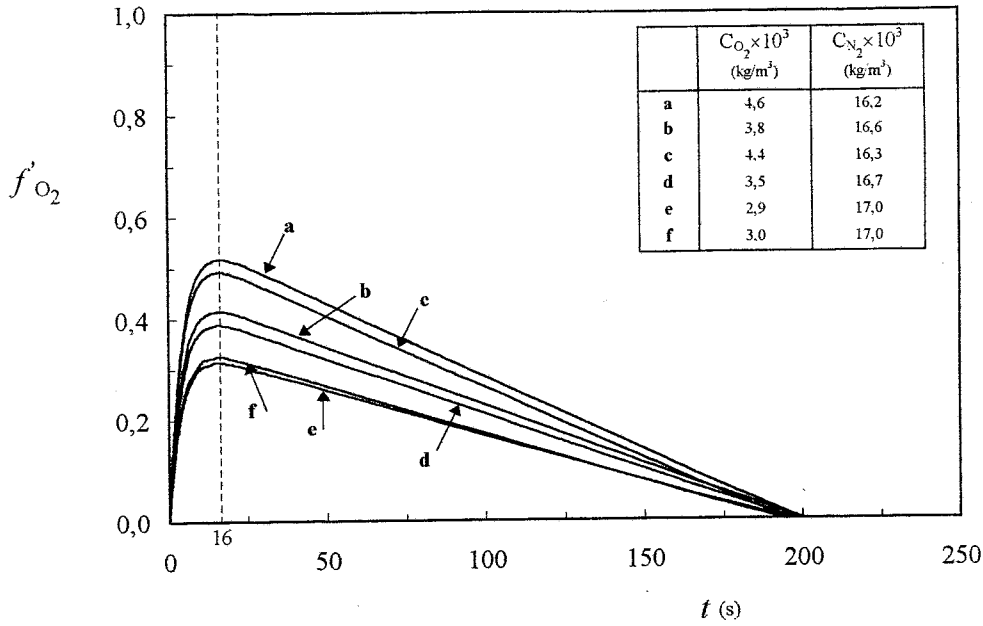


Figura 4.17 - Evolução, com o tempo, da fracção de oxigénio ganho por uma microbolha de azoto de diâmetro inicial igual a 60 μm , relativamente à massa de oxigénio existente numa bolha de ar com diâmetro de 60 μm ($3,215 \times 10^{-14}$ kg), para diferentes concentrações de oxigénio e azoto dissolvidos na água

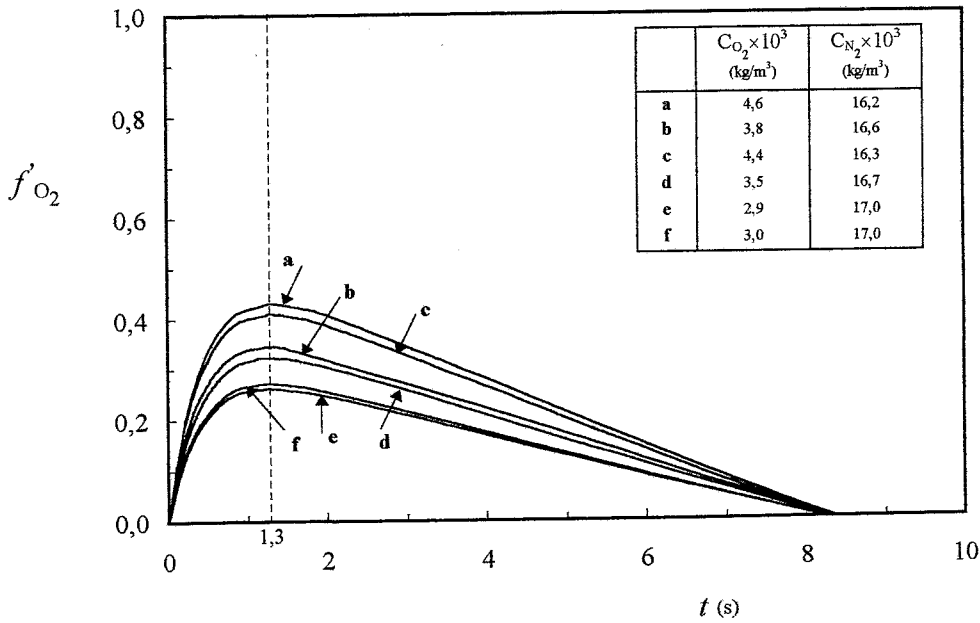


Figura 4.18 - Evolução, com o tempo, da fracção de oxigénio ganho por uma microbolha de azoto de diâmetro inicial igual a 20 μm , relativamente à massa de oxigénio existente numa bolha de ar com diâmetro de 20 μm ($1,300 \times 10^{-15}$ kg), para diferentes concentrações de oxigénio e azoto dissolvidos na água

Em todas as curvas $f'_{O_2}(t)$ representadas nas figuras 4.16 a 4.18 pode observar-se um comportamento idêntico ao da curva da figura 4.13(d). A existência de duas zonas distintas é também aqui evidenciada, podendo considerar-se que a linha vertical representada a tracejado nos gráficos das três figuras (4.16 a 4.18) estabelece a “fronteira” entre as duas fases da evolução das microbolhas. Como se pode ver, o tempo para o qual é atingido o máximo de $f'_{O_2}(t)$, e que demarca o início da segunda fase, é basicamente independente das condições experimentais, variando apenas com o tamanho da bolha.

Verifica-se ainda que, regra geral, a diminuição do tamanho da bolha corresponde também a uma diminuição do valor máximo de $f'_{O_2}(t)$. Isto equivale a dizer que a quantidade máxima de oxigénio que uma bolha (inicialmente de azoto), com um dado diâmetro inicial, consegue “retirar” do líquido, relativamente à massa de oxigénio existente numa bolha de ar desse tamanho, é tanto menor quanto menor o tamanho da bolha. Tendo presente que o tempo de dissolução completa é fortemente influenciado pelo tamanho inicial da bolha e que, portanto, quanto menor for a bolha, maior é a probabilidade de ela se dissolver na totalidade, “devolvendo” todo o oxigénio à água, pode desde já concluir-se que as microbolhas mais pequenas serão as menos “eficazes” na desabsorção de oxigénio da água.

Será agora importante comparar os resultados apresentados nas figuras 4.16 a 4.18 (*desabsorção*) com os resultados correspondentes, relativos a microbolhas de ar, apresentados nas figuras 4.10 a 4.12 (*absorção*). Isto será feito no ponto seguinte, com o objectivo de salientar alguns aspectos relevantes que serão úteis para uma posterior quantificação da contribuição das microbolhas na taxa global de absorção e desabsorção de oxigénio.

iii) Alguns aspectos sugeridos pelas curvas $f_{O_2}(t)$ (microbolhas de ar) e $f'_{O_2}(t)$ (microbolhas de azoto)

É importante começar por observar novamente as figuras 4.10 a 4.12 e 4.16 a 4.18. Para cada par de figuras, relativo ao mesmo diâmetro inicial (figuras 4.10 e 4.16, 4.11 e 4.17, 4.12

e 4.18), podem comparar-se as curvas $f_{O_2}(t)$ e $f'_{O_2}(t)$ identificadas pela mesma letra, que correspondem a ensaios de absorção e desabsorção, respectivamente, realizados nas mesmas condições operatórias (diâmetro do orifício e caudal de borbulhamento). Tal como foi definida a variável f'_{O_2} , é possível comparar directamente os valores de f_{O_2} e f'_{O_2} , já que ambos têm como referência a quantidade de oxigénio existente numa bolha de ar com o tamanho inicial da bolha em causa.

Independentemente do tamanho da bolha e das condições experimentais, observa-se que, para o tempo em que $f'_{O_2}(t)$ atinge o valor máximo, o valor de f_{O_2} (correspondente ao mesmo tamanho de bolha, e para as mesmas condições operatórias - ϕ e $\dot{V}_g$) é sempre superior ao valor de f'_{O_2} . Exceptua-se um caso (curva c, $d_0 = 100 \mu m$), para o qual os dois valores são sensivelmente iguais. Dito de outra forma, para os mesmos orifício e caudal de borbulhamento, a quantidade máxima de oxigénio que uma dada microbolha, inicialmente de azoto, é capaz de retirar da água (de que se está a fazer o *stripping* do oxigénio) é inferior à quantidade de oxigénio transferida para a água, no mesmo intervalo de tempo, por uma microbolha de ar, com o mesmo tamanho inicial (quando se procede à oxigenação da água).

Esta constatação indica, desde já, que, para tempos de permanência das microbolhas no líquido iguais ou superiores ao intervalo de tempo em que $f'_{O_2}(t)$ atinge o máximo, a contribuição, para a transferência de oxigénio, das microbolhas (de ar), em *absorção*, será sempre mais importante do que a das microbolhas (de azoto), em *desabsorção*. Quanto maior for o tempo de permanência das microbolhas na água, maior será a diferença entre as duas contribuições. No limite, se as microbolhas se dissolverem totalmente, a sua contribuição, em *desabsorção*, será obviamente nula.

Verifica-se, ainda, que a diferença entre o valor máximo de $f'_{O_2}(t)$ e o valor de $f_{O_2}(t)$, para o mesmo instante, se acentua para as bolhas de menor tamanho. Por outro lado, a probabilidade de qualquer microbolha (de ar ou de azoto) se dissolver totalmente é tanto maior quanto menor o seu tamanho. Pode então concluir-se que, se uma dada fracção do caudal de borbulhamento se dispersar no líquido sob a forma de microbolhas, as diferenças entre os valores das taxas de absorção e de desabsorção, para determinadas condições

experimentais, serão tanto mais significativas, quanto menores os tamanhos das microbolhas formadas.

Surge aqui, novamente, a necessidade de conhecer o tempo real de permanência das microbolhas no líquido para poder quantificar a sua contribuição na taxa de transferência de oxigénio. Tendo analisado a dissolução das microbolhas em função do seu tamanho inicial, será também interessante ter uma perspectiva de como o tempo de residência pode variar em função do tamanho das microbolhas.

A “vida” de uma microbolha, num líquido, pode ser interrompida de duas formas: pelo colapso da bolha, ou pela sua libertação através da superfície livre do líquido.

No gráfico da figura 4.19, representa-se o tempo total de subida, t_s , em líquido parado, de microbolhas de ar e de azoto, em função do seu diâmetro inicial, d_0 . Para o cálculo de t_s , considerou-se a altura total de líquido na coluna de 120 mm, e, ao longo da subida, o diâmetro da bolha foi “actualizado”, em função do gás dissolvido, sendo a velocidade terminal calculada em função desse diâmetro, pela equação (4.21). As condições experimentais para as quais foi efectuado o cálculo foram as dos ensaios de absorção (microbolhas de ar) e desabsorção (microbolhas de azoto), verificadas com o orifício de 0,2 mm e para o caudal de borbulhamento de $5,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

Representa-se também, no gráfico da figura 4.19, a variação do tempo de dissolução total, t_c , de microbolhas de ar (em absorção) e azoto (em desabsorção), para aquelas condições experimentais, em função do respectivo diâmetro inicial.

O gráfico da figura 4.19 mostra que, para $d_0 \leq 100 \text{ }\mu\text{m}$, os tempos de dissolução das microbolhas de ar são muito próximos dos tempos de dissolução das microbolhas de azoto, com o mesmo diâmetro inicial. (Esta proximidade regista-se igualmente para as outras condições da tabela 4.3).

Por análise do gráfico da figura 4.19, verifica-se também que bolhas de diâmetro inicial inferior a cerca de $40 \text{ }\mu\text{m}$ são totalmente absorvidas numa distância que é pequena comparada com a altura total de líquido. Para bolhas com diâmetros iniciais entre 50 e $60 \text{ }\mu\text{m}$, os tempos de dissolução completa, t_c , são da ordem dos valores de t_s . Para bolhas de tamanho superior a $70 \text{ }\mu\text{m}$, o tempo de dissolução completa é bastante superior ao tempo de subida.

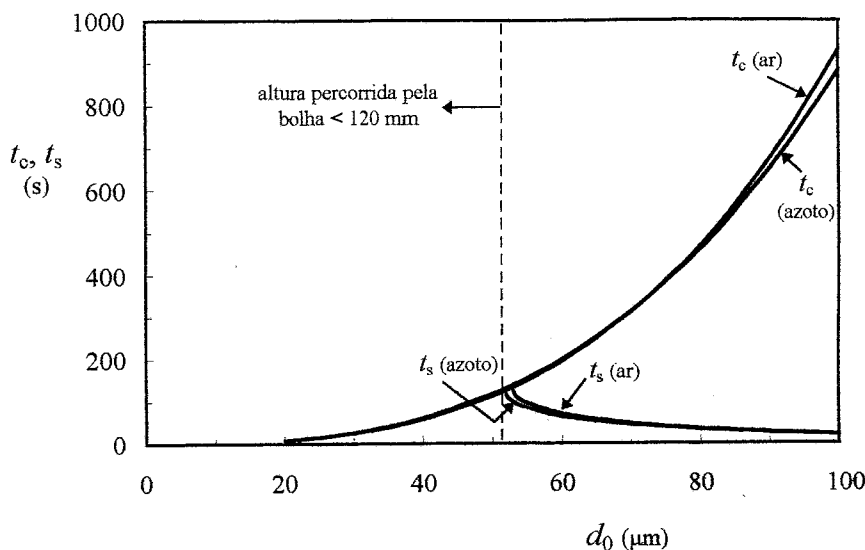


Figura 4.19 - Tempos de dissolução total, t_c , e tempos de subida ($h = 120$ mm), t_s , de bolhas de ar e de azoto, em função do seu diâmetro inicial, d_0 , em ensaios de absorção e desabsorção, respectivamente, e nas condições experimentais verificadas para o orifício de 0,2 mm e para o caudal de borbulhamento de $5,2 \times 10^{-6}$ m³/s

Poder-se-ia concluir, portanto, que, havendo um mecanismo de transferência suplementar que justifique o acréscimo dos coeficientes de transferência de massa relativamente aos valores teóricos, só teria sentido considerar microbolhas com diâmetro inferior a cerca de 70 μm , pois as restantes mais facilmente poderão escapar do líquido, antes da sua dissolução completa. No entanto, nesta análise está a considerar-se o tempo de subida em líquido parado. Bolhas de tamanho desta ordem de grandeza são mais facilmente arrastadas para o interior do líquido, pelo que bolhas com 80 μm de diâmetro ou mais poderão também dissolver-se na totalidade, antes de se libertarem pela superfície livre do líquido.

Para além destes aspectos fundamentais revelados pela análise do gráfico da figura 4.19, refere-se, como curiosidade, o facto de as curvas $t_c(d_0)$ serem bem ajustadas por funções do tipo $t_c = A d_0^b$. Verifica-se ainda que o expoente b toma um valor muito próximo de 3 (para ambos os gases). Assim, para as microbolhas de ar, $t_c = 0,95 \times 10^{-3} d_0^{2,99}$, com t_c em segundos e d_0 em μm , e, para as microbolhas de azoto, $t_c = 1,43 \times 10^{-3} d_0^{2,90}$. Esta dependência sugere que, se se representasse o tempo de dissolução das bolhas em função do seu volume

inicial, $V_0 = (\pi/6)d_0^3$, a respectiva variação seria linear. Com efeito, os pontos obtidos seriam bem ajustados pelas seguintes rectas (com t_c em segundos e V_0 em μm^3):

$$t_c = 1,73 \times 10^{-3} V_0 - 0,254 \quad (d_0 < 50 \mu\text{m}) \text{ e}$$

$$t_c = 1,78 \times 10^{-3} V_0 - 4,84 \quad (50 < d_0 \leq 100 \mu\text{m}), \text{ para as microbolhas de ar, e}$$

$$t_c = 1,80 \times 10^{-3} V_0 + 0,834 \quad (d_0 < 50 \mu\text{m}) \text{ e}$$

$$t_c = 1,67 \times 10^{-3} V_0 + 11,0 \quad (50 < d_0 \leq 100 \mu\text{m}), \text{ para as microbolhas de azoto.}$$

Os resultados apresentados até aqui (i), ii) e iii)) foram obtidos para $\sigma = 72 \times 10^{-3} \text{ N/m}$, que é o valor da tensão superficial do sistema água-ar, a 25°C . Em seguida, apresentam-se alguns resultados da simulação da evolução de microbolhas, para um valor da tensão superficial consideravelmente mais baixo ($41 \times 10^{-3} \text{ N/m}$), que corresponde ao valor da tensão superficial, medido experimentalmente, da água a que foi adicionado anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v). Relembra-se que foram realizados ensaios de absorção (tipo A) e desabsorção (tipo C), com adição de anti-espuma à água, tendo como objectivo a “eliminação” das bolhas retidas junto à superfície livre do líquido.

iv) Simulação da evolução de microbolhas, em água com anti-espuma ($\sigma = 41 \times 10^{-3} \text{ N/m}$)

Serão apresentados aqui apenas alguns resultados ilustrativos da influência da variação da tensão superficial do sistema, na evolução das microbolhas. Para facilitar a análise, a simulação foi efectuada utilizando valores das concentrações de oxigénio e azoto dissolvidos no líquido, iguais aos observados nos ensaios feitos com água *sem* anti-espuma (tabela 4.3).

No gráfico da figura 4.20, comparam-se as curvas $f_{\text{O}_2}(t)$ obtidas para microbolhas de ar, de $100 \mu\text{m}$ de diâmetro inicial, imersas em água ($\sigma = 72 \times 10^{-3} \text{ N/m}$) e em água com anti-espuma ($\sigma = 41 \times 10^{-3} \text{ N/m}$), sendo as concentrações médias de oxigénio e azoto dissolvidos no líquido (longe da bolha) de $3,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ e $16,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, respectivamente.

No gráfico da figura 4.21, apresentam-se as curvas $f'_{O_2}(t)$ obtidas para microbolhas inicialmente de azoto, com 100 μm de diâmetro inicial, imersas em água ($\sigma = 72 \times 10^{-3} \text{ N/m}$) e em água com anti-espuma ($\sigma = 41 \times 10^{-3} \text{ N/m}$), para concentrações médias de oxigénio e azoto dissolvidos no líquido (longe da bolha) de $3,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ e $16,6 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, respectivamente.

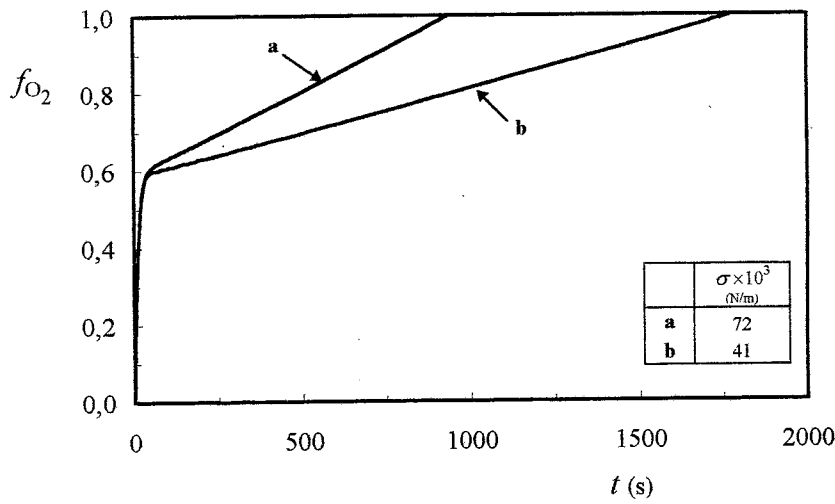


Figura 4.20 - Variação de f_{O_2} com o tempo, para uma microbolha de ar de diâmetro inicial 100 μm , em água (a), e em água com anti-espuma (b), com concentrações médias de oxigénio e azoto dissolvidos de $3,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ e $16,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, respectivamente

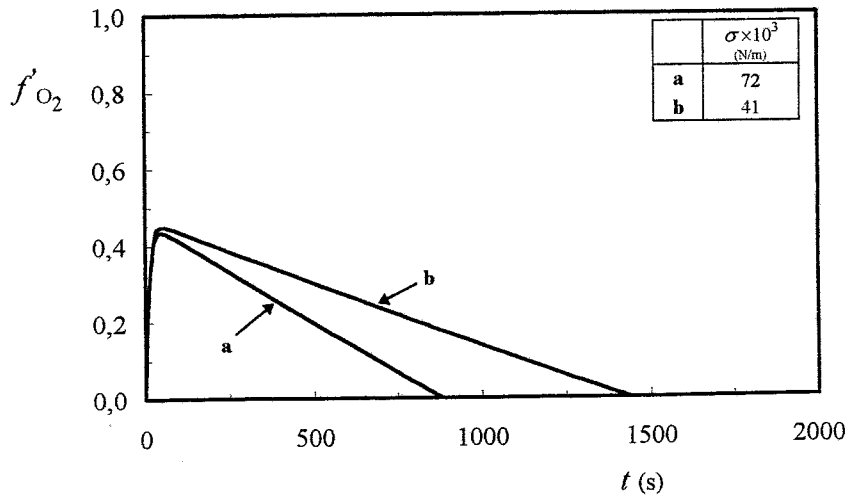


Figura 4.21 - Variação de f'_{O_2} com o tempo, para uma microbolha de azoto de diâmetro inicial 100 μm , em água (a), e em água com anti-espuma (b), com concentrações médias de oxigénio e azoto dissolvidos de $3,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ e $16,6 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, respectivamente

Os gráficos das figuras 4.20 e 4.21 evidenciam claramente o efeito da variação da tensão superficial no processo de dissolução das microbolhas de ar ou de azoto. O primeiro período (controlado pela variação das fracções molares dos solutos na bolha) não é praticamente afectado pela diminuição da tensão superficial. A taxa de dissolução das microbolhas na segunda fase, comandada, como se viu, pela tensão superficial, diminui com a redução do valor da tensão superficial, conduzindo a tempos de colapso das microbolhas mais elevados.

Isto mesmo é visível no gráfico da figura 4.22, onde se comparam os tempos de dissolução completa de microbolhas (de ar), em função do respectivo diâmetro inicial, em água ($\sigma = 72 \times 10^{-3}$ N/m) e em água com anti-espuma ($\sigma = 41 \times 10^{-3}$ N/m), sendo as concentrações médias de oxigénio e azoto dissolvidos no líquido (longe da bolha) de $3,8 \times 10^{-3}$ kg/m³ e $16,8 \times 10^{-3}$ kg/m³, respectivamente.

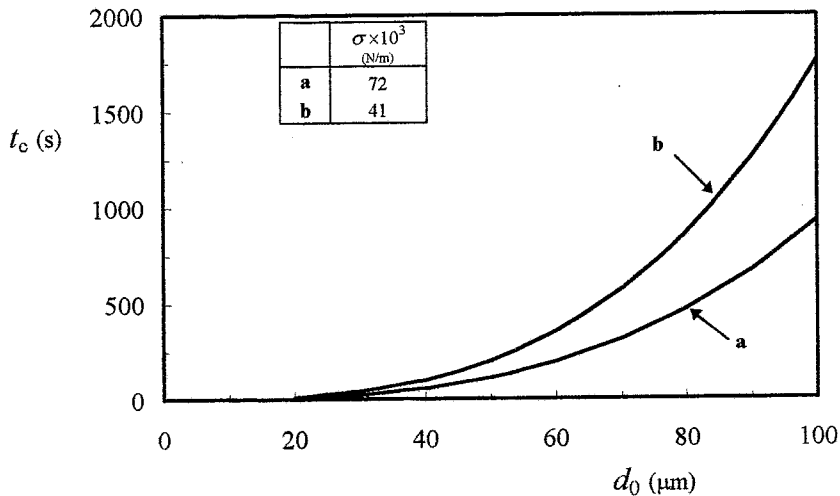


Figura 4.22 - Variação do tempo de dissolução total, t_c , de microbolhas de ar, com o respectivo diâmetro inicial, d_0 , em água (a), e em água com anti-espuma (b), com concentrações médias de oxigénio e azoto dissolvidos no líquido de $3,8 \times 10^{-3}$ kg/m³ e $16,8 \times 10^{-3}$ kg/m³, respectivamente

Nas condições da figura 4.22, e para os tamanhos considerados ($20 < d_0 < 100$ µm) os tempos de colapso das microbolhas, em água com anti-espuma, são de 1,7 a 1,9 vezes superiores aos correspondentes tempos de colapso, em água.

Como a diminuição do diâmetro das microbolhas é mais lenta, em água com anti-espuma, aumenta a probabilidade de elas saírem mais facilmente do líquido, durante o processo de dissolução. Em *absorção*, isso corresponde a uma diminuição efectiva da taxa de transferência de oxigénio para o líquido, relativamente ao que acontece em água sem anti-espuma, o que aliás já era visível no gráfico da figura 4.20, para um dado valor de t ($50 < t < 900$ s). Em *desabsorção*, o facto de uma dada microbolha se libertar mais facilmente do líquido, na presença de anti-espuma, traduz-se numa contribuição efectiva mais importante para a taxa de desabsorção de oxigénio (do líquido), do que em água sem anti-espuma (figura 4.21).

Em termos comparativos, pode então dizer-se que, se os tempos de residência no líquido de microbolhas com um dado tamanho inicial não forem suficientes para a sua dissolução completa, a contribuição dessas microbolhas em *absorção* e em *desabsorção* será mais próxima, em água *com* anti-espuma, do que em água *sem* anti-espuma.

4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste capítulo, foi evidenciada a relevância da possível contribuição de microbolhas na taxa global de transferência de oxigénio, nas condições do presente trabalho.

Viu-se, na secção 4.2.2, que uma muito pequena fracção do caudal de ar dispersa sob a forma de microbolhas, que se dissolvam completamente na água, pode representar uma contribuição muito significativa para a taxa global de transferência de oxigénio para a água (absorção). A dissolução de um volume idêntico de gás na forma de microbolhas (de azoto), quando se procede à desabsorção de oxigénio da água, com azoto, não representa qualquer acréscimo na taxa de desabsorção de oxigénio, uma vez que o oxigénio inicialmente retirado (da água) pelas microbolhas é, pelo colapso destas, restituído à água.

A experiência confirmou que, em condições operatórias idênticas, de borbulhamento intenso, as taxas de absorção de oxigénio são normalmente superiores às taxas de desabsorção de oxigénio.

Os resultados apresentados na secção 4.6 mostraram que os tempos de dissolução completa de microbolhas de ar (*absorção*) e de azoto (*desabsorção*), com um dado tamanho inicial, são muito próximos, para condições operatórias idênticas.

Concluiu-se que, quanto menores forem os tamanhos das microbolhas em que esteja disperso um dado volume de gás (fracção do caudal de borbulhamento na coluna), maior será a sua contribuição para a *absorção* de oxigénio e mais reduzida ela será para a *desabsorção* de oxigénio. Viu-se ainda que, mesmo que não cheguem a dissolver-se completamente, as microbolhas de gás (de maiores tamanhos) terão, na generalidade, uma contribuição mais importante em *absorção* do que em *desabsorção*.

Na presença de anti-espuma, os tempos de dissolução completa das microbolhas (de ar e azoto) são consideravelmente mais elevados, o que permite concluir que, para uma mesma distribuição de tamanhos de microbolhas, em água sem anti-espuma e em água com anti-espuma, as possíveis contribuições das microbolhas para a transferência de oxigénio em *absorção* e em *desabsorção* serão mais próximas, em água *com* anti-espuma, do que em água *sem* anti-espuma.

Não se afirma, como nunca se afirmou até aqui, que o contributo das microbolhas é o único responsável pelo acréscimo verificado das taxas de transferência de oxigénio relativamente aos valores previstos. Os resultados que aqui se apresentaram indicam, contudo, que esse contributo é, sem dúvida, importante.

As “pistas” levantadas permitirão analisar os resultados obtidos no estudo experimental de transferência de oxigénio, sob uma nova perspectiva. Impõe-se a necessidade de reformular o modelo teórico apresentado no Capítulo 2, para descrever o processo de transferência de massa numa coluna de borbulhamento. O modelo teórico deve incluir a contribuição (inequívoca) das microbolhas, como um 5º termo, a acrescentar à transferência através das bolhas (em formação, em subida no líquido e retidas junto à superfície livre) e através da superfície livre do líquido.

Essa análise será feita no capítulo seguinte, bem como a apresentação e discussão dos resultados.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS. NOTA INTRODUTÓRIA

Dado o volume considerável de resultados experimentais obtidos neste trabalho, eles são apresentados na sua totalidade em Apêndice (Apêndice B.1). Os valores dos vários coeficientes de transferência de massa, calculados a partir dos resultados experimentais, e que irão ser aqui apresentados, graficamente, também se encontram tabelados no Apêndice B.1.

Foi feito o cálculo do erro mais provável para cada um dos valores dos coeficientes calculados, em função das incertezas associadas à medição das diferentes variáveis de cálculo.

Os resultados da análise estatística das regressões lineares utilizadas na determinação dos coeficientes de transferência individuais seriam muito penalizados, na maioria dos casos, pelo número reduzido de pontos (normalmente 5) utilizados nas regressões. No entanto, cada um dos 5 pontos, considerados para um dado ajuste, pode ser realmente visto como mais do que um ponto experimental, uma vez que corresponde a um valor de estado estacionário. Os valores das concentrações de oxigénio dissolvido, à entrada e à saída do borbulhador principal, eram registados depois de terem atingido um valor constante, cuja “invariância” era verificada ao longo de um certo intervalo de tempo.

Poder-se-iam ainda apontar alguns motivos de ordem prática, que justificaram não utilizar um maior número de “valores” de h (altura de líquido no borbulhador), nos ensaios experimentais: a sensibilidade dos medidores de oxigénio (que pôs de lado a realização de experiências para um maior número de valores intermédios, ou inferiores, de h), e ainda o desvio das condições de agitação perfeita, que se verificaria para valores superiores de h (para os menores caudais de borbulhamento).

5.2 COEFICIENTES GLOBAIS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA

5.2.1 Absorção de oxigénio

Os coeficientes globais de transferência de massa, $(kA)_{\text{global}}$, relativos à absorção de oxigénio do ar para a água, foram determinados a partir dos resultados das experiências do tipo A (descritas no Capítulo 2, secção 2.2.2), por utilização da equação (2.7). Os valores obtidos de $(kA)_{\text{global}}$, para os vários caudais de ar e para os diferentes orifícios (0,2, 0,3 e 3,0 mm), foram já apresentados no Capítulo 2, nos gráficos das figuras 2.27 a 2.29, em função de h e encontram-se em Apêndice (Apêndice B.1), nas tabelas B.1.1 a B.1.3.

Os valores de $(kA)_{\text{global}}$ obtidos em condições experimentais idênticas, em água com Fumexol 0,02% v/v, podem ser encontrados nas tabelas B.1.4 a B.1.6 (Apêndice B.1).

5.2.2 Desabsorção de oxigénio

Pelo facto de se ter levantado a hipótese de as microbolhas poderem ter uma contribuição diferente em absorção e em desabsorção, realizaram-se experiências, tipo C, descritas no Capítulo 4 (secção 4.3). Nestes ensaios, borbulhava-se azoto através do orifício central, no borbulhador principal, de forma a promover a desabsorção do oxigénio da água. Foram realizados ensaios, com os diferentes orifícios (0,2, 0,3 e 3,0 mm), para as várias condições que tinham sido utilizadas nos ensaios tipo A. Os resultados experimentais dos ensaios tipo C, que são apresentados no Apêndice B.1 (tabelas B.1.13 a B.1.18), conduziram à determinação de coeficientes globais de desabsorção, $(kA)_{\text{global}}^d$, por utilização da equação (4.6). Os valores de $(kA)_{\text{global}}^d$ obtidos em água estão representados, graficamente, nas figuras 5.1 a 5.3, em função de h . Os valores de $(kA)_{\text{global}}^d$ obtidos em água com Fumexol (0,02% v/v) são apresentados nas tabelas B.1.16 a B.1.18 (Apêndice B.1).

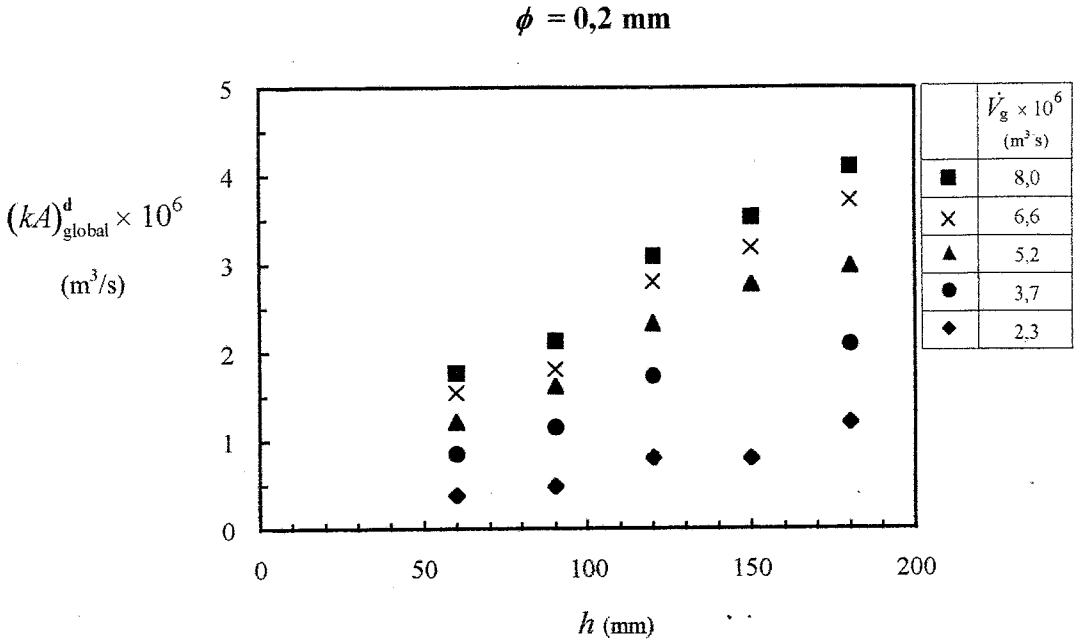


Figura 5.1 - Representação do coeficiente global de desabsorção de oxigénio, $(kA)_{\text{global}}^d$, em função da altura de líquido na coluna, h , para vários caudais de borbulhamento e para o orifício de 0,2 mm (água sem aditivos)

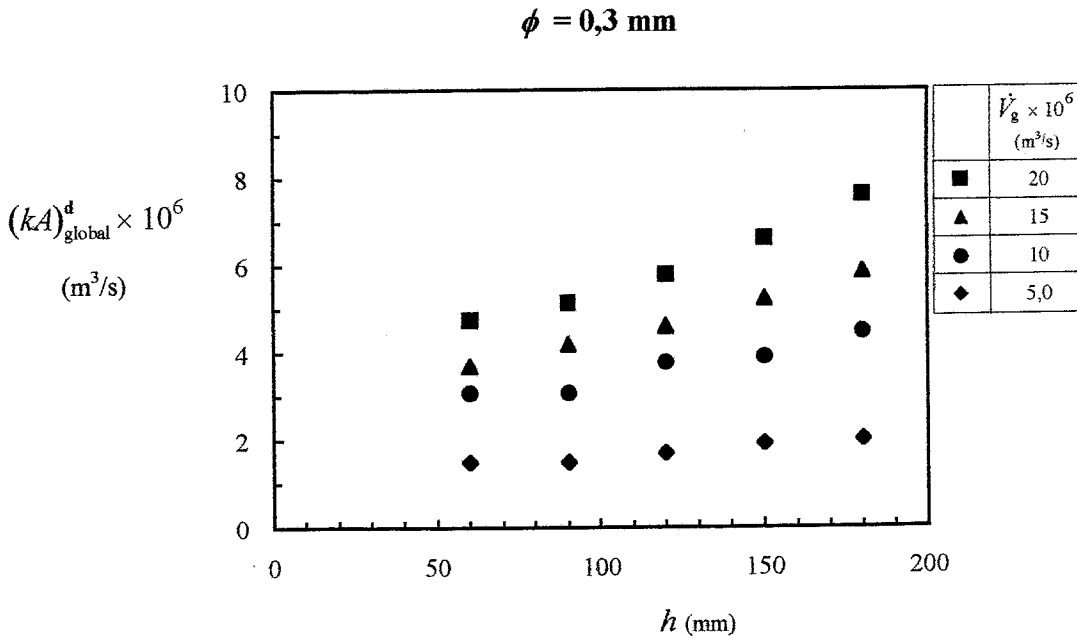


Figura 5.2 - Representação do coeficiente global de desabsorção de oxigénio, $(kA)_{\text{global}}^d$, em função da altura de líquido na coluna, h , para vários caudais de borbulhamento e para o orifício de 0,3 mm (água sem aditivos)

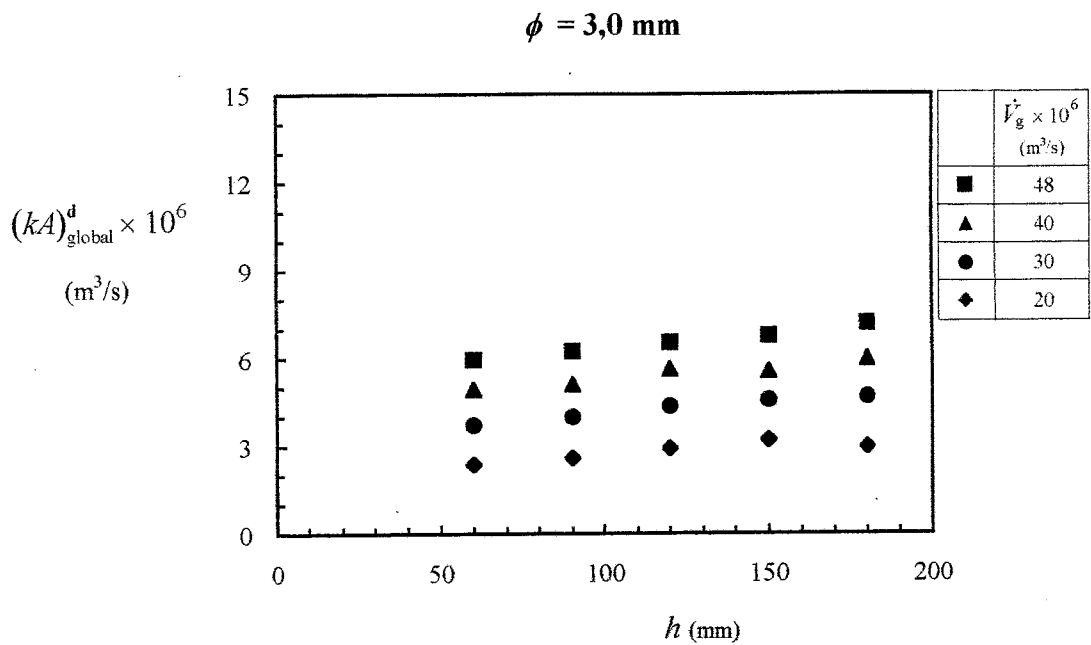


Figura 5.3 - Representação do coeficiente global de desabsorção de oxigénio, $(kA)_{\text{global}}^d$, em função da altura de líquido na coluna, h , para vários caudais de borbulhamento e para o orifício de 3,0 mm (água sem aditivos)

Os gráficos das figuras 5.1 a 5.3 mostram que os coeficientes globais de transferência de massa, $(kA)_{\text{global}}^d$, relativos à desabsorção de oxigénio da água por azoto, aumentam sistematicamente com o caudal de gás e com a altura de líquido no borbulhador. Este comportamento é idêntico, tal como se esperava, ao que foi observado para os coeficientes globais de absorção de oxigénio, $(kA)_{\text{global}}^d$, do ar para a água. Também se verifica que, tomando o mesmo caudal de borbulhamento, os valores de $(kA)_{\text{global}}^d$ são, na sua grande maioria, superiores para o orifício de menor diâmetro. Tomando, por exemplo, o caudal de gás de $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, os valores de $(kA)_{\text{global}}^d$ variam entre $5,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ e $7,7 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, na gama completa de alturas consideradas, para o orifício de 0,3 mm, e entre $2,4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ e $2,9 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, quando se utiliza o orifício de 3,0 mm. Uma das razões que pode justificar estas diferenças já foi indicada na secção 2.4.2, onde são apresentados os valores dos coeficientes globais de absorção de oxigénio do ar para a água. Referiu-se, então, o facto de a

injecção do mesmo caudal de gás, através de orifícios de diferentes diâmetros, dar origem à formação de bolhas mais pequenas, no orifício de menor diâmetro, gerando por isso uma maior área interfacial. Como se pode verificar, as diferenças são mais significativas ao passar do orifício de 0,3 para o de 3,0 mm, do que entre os orifícios de 0,2 e 0,3 mm.

Comparando os valores de $(kA)_{\text{global}}^d$, obtidos para os diferentes orifícios, pode constatar-se que a variação de $(kA)_{\text{global}}^d$ com a altura de líquido no borbulhador, h , é, para todos os caudais de borbulhamento, menos acentuada para o orifício de 3,0 mm do que para os outros dois orifícios. Ver-se-á mais adiante (secção 5.3.3) porquê. Tomando de novo o caudal de $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, para o orifício de 0,3 mm, o valor de $(kA)_{\text{global}}^d$ é, para $h = 180 \text{ mm}$, cerca de 50% superior ao valor de $(kA)_{\text{global}}^d$ para $h = 60 \text{ mm}$. Para o orifício de 3,0 mm, a diferença entre os valores de $(kA)_{\text{global}}^d$ correspondentes àquelas duas alturas de líquido é de apenas 20% (relativamente ao menor valor).

Vão agora comparar-se os valores de $(kA)_{\text{global}}^d$ com os correspondentes valores de $(kA)_{\text{global}}$, obtidos em condições experimentais idênticas (orifício, caudal de borbulhamento, altura de líquido no borbulhador). Os gráficos que vão comparar-se serão então os das figuras 2.27 e 5.1, 2.28 e 5.2, e 2.29 e 5.3.

Uma primeira análise geral de todos os gráficos mostra que, na sua grande maioria, os valores de $(kA)_{\text{global}}^d$ (*desabsorção*) são inferiores aos correspondentes valores de $(kA)_{\text{global}}$ (*absorção*).

Para o orifício de 0,2 mm, os valores obtidos de $(kA)_{\text{global}}^d$ variam entre 35% e 90% dos correspondentes valores de $(kA)_{\text{global}}$. Deve chamar-se a atenção para o facto de, para este orifício, os erros experimentais associados à medição de concentrações de oxigénio dissolvido, conduzirem a maiores imprecisões nos resultados finais. Como as diferenças de concentrações à entrada e à saída do borbulhador são, neste caso, normalmente mais pequenas, atendendo aos baixos valores do caudal de borbulhamento, os valores calculados a partir dessas diferenças são afectados de um erro maior (ver Apêndice B.1).

Para o orifício de 0,3 mm, os valores de $(kA)_{\text{global}}^d$ variam entre 73% e 100% dos correspondentes valores de $(kA)_{\text{global}}$. Finalmente, para o orifício de 3,0 mm, os valores de $(kA)_{\text{global}}^d$ obtidos variam entre 50 e 80% dos respectivos valores de $(kA)_{\text{global}}$.

Verifica-se que, para todos os orifícios, considerando a mesma altura de líquido, as diferenças entre os valores de $(kA)_{\text{global}}$ e de $(kA)_{\text{global}}^d$ são genericamente superiores para maiores caudais de borbulhamento.

A forma como as diferenças entre os dois coeficientes globais ($(kA)_{\text{global}}$ e $(kA)_{\text{global}}^d$) variam com o caudal de borbulhamento, está provavelmente relacionada com a contribuição das microbolhas. Esta contribuição depende de factores como frequência de formação, distribuição de tamanhos e tempos de residência das microbolhas. É impossível, pelo menos com a informação disponível, estabelecer uma dependência entre a combinação desses três parâmetros, que determinará a contribuição efectiva das microbolhas para a transferência de oxigénio, e variáveis como o caudal de borbulhamento, altura de líquido ou diâmetro do orifício para injeção do gás. Se, quanto à distribuição de tamanhos, não é possível prever de que forma ela é influenciada pelo caudal de borbulhamento, pela altura de líquido na coluna, ou ainda pelo diâmetro do orifício, já será razoável admitir que maiores caudais de borbulhamento deverão promover a formação de um maior número de microbolhas, assim como maiores alturas de líquido poderão proporcionar um maior tempo de residência às microbolhas, em particular às de maior tamanho, que poderão assim chegar a dissolver-se totalmente, em vez de se libertarem pela superfície livre.

Nas secções seguintes vão considerar-se, separadamente, as contribuições individuais para a taxa global de transferência, relativas às quatro “regiões” distintas da coluna de borbulhamento, propostas para o desenvolvimento do modelo apresentado no Capítulo 2, às quais se acrescenta, agora, a contribuição das microbolhas.

5.3 COEFICIENTES INDIVIDUAIS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA

5.3.1 Reformulação do modelo teórico de transferência de massa, na coluna de borbulhamento

O modelo teórico apresentado no Capítulo 2, para descrever o processo de transferência de massa, numa coluna de borbulhamento, englobava quatro contribuições distintas, associadas a quatro regiões da coluna com características hidrodinâmicas diferentes.

A cada uma das quatro zonas identificadas na coluna de borbulhamento - *formação e subida* das bolhas, bolhas *retidas* à superfície e *superfície livre* do líquido, fez-se corresponder um coeficiente de transferência individual, tendo-se definido a taxa global de transferência (de oxigénio) como

$$\dot{n} = \left[(kA)_f + (ka^*)_s h + (kA)_r + (kA)_{sl} \right] (C^* - C) \quad (2.3)$$

em que a força directriz, $(C^* - C)$, é comum aos 4 termos, uma vez que a pressão parcial de oxigénio na fase gasosa e, portanto, C^* , se pode considerar constante (Apêndice A.2).

Face aos resultados experimentais obtidos nos ensaios de transferência de massa, concluiu-se que o modelo representado pela equação (2.3) era insuficiente para descrever o processo global de transferência de massa. De acordo com os resultados dos Capítulos 3 e 4, existe uma taxa de transferência de massa adicional, associada às microbolhas, que poderá ser designada por $\dot{n}_{mb}$. O valor de $\dot{n}_{mb}$ será função da “população” de microbolhas (número e distribuição de tamanhos) presente na coluna, em cada instante. Considerando que, em condições operatórias fixas (caudal de borbulhamento, altura de líquido na coluna, diâmetro do orifício), essa população “atinge” um dado estado estacionário e, por isso, $\dot{n}_{mb}$ pode tomar um valor constante, a taxa global de transferência de massa na coluna de borbulhamento será dada por

$$\dot{n} = \left[(kA)_f + (ka^*)_s h + (kA)_r + (kA)_{sl} \right] (C^* - C) + \dot{n}_{mb} \quad (2.3.a)$$

A principal dificuldade em incluir a contribuição das microbolhas na equação (2.3.a) como um produto de um coeficiente de transferência individual pela força directriz comum aos outros termos reside no facto de, para as microbolhas, C^* poder variar significativamente ao longo da sua dissolução (ver secção 4.6.2). Apesar de não ser, por isso, fisicamente correcto, pode, no entanto, exprimir-se $\dot{n}_{mb}$ como o produto de um coeficiente “fictício” de transferência de massa, $(kA)_{mb} = \frac{\dot{n}_{mb}}{(C^* - C)}$, pelo “factor” $(C^* - C) (\neq 0)$, que representa a força directriz (constante) relativa aos outros termos. A equação (2.3.a) será assim equivalente a

$$\dot{n} = \left[(kA)_f + (ka^*)_s h + (kA)_r + (kA)_{sl} + (kA)_{mb} \right] (C^* - C) \quad (2.3.b)$$

e o coeficiente global de transferência de massa, $(kA)_{global}$, definido a partir da equação de transferência

$$\dot{n} = (kA)_{global} (C^* - C) \quad (2.4)$$

passará, desta forma, a incluir não quatro, mas cinco termos

$$(kA)_{global} = (kA)_f + (ka^*)_s h + (kA)_r + (kA)_{sl} + (kA)_{mb} \quad (2.5.a)$$

Estando a ocorrer *desabsorção* na coluna de borbulhamento, e considerando que a pressão parcial de oxigénio, nas bolhas de azoto e na atmosfera em contacto com a superfície livre do líquido, é aproximadamente nula, (Apêndice A.2), a taxa de transferência de oxigénio pode ser expressa como

$$\dot{n} = (kA)_{global}^d (0 - C) \quad (4.5)$$

O coeficiente global de desabsorção de oxigénio, $(kA)_{\text{global}}^d$, será, à semelhança de $(kA)_{\text{global}}$,

$$(kA)_{\text{global}}^d = (kA)_f + (ka^*)_s h + (kA)_r + (kA)_{\text{sl}} + (kA)_{\text{mb}}^d \quad (2.5.b)$$

em que $(kA)_{\text{mb}}^d = \frac{(\dot{n}_{\text{mb}})^d}{(0-C)}$, e $(\dot{n}_{\text{mb}})^d$ representa agora a taxa de transferência de oxigénio associada às microbolhas, em *desabsorção*. Como se viu nos Capítulos 3 e 4, $(\dot{n}_{\text{mb}})^d$ (*desabsorção*) pode diferir bastante de $\dot{n}_{\text{mb}}$ (*absorção*). Já os coeficientes individuais correspondentes às quatro zonas da coluna de borbulhamento (formação, subida, bolhas retidas junto à superfície livre, e superfície livre do líquido) devem ser próximos, dadas as semelhanças das propriedades físicas dos dois sistemas (ar-água e azoto-água).

A determinação do coeficiente de transferência de oxigénio através da superfície livre, $(kA)_{\text{sl}}$, foi feita na secção 2.3.2, considerando que $(kA)_{\text{global}}$ era igual a $(kA)_{\text{global}}^d$, para condições operatórias idênticas. Verificou-se, experimentalmente, que os valores de $(kA)_{\text{global}}$ e de $(kA)_{\text{global}}^d$ podem diferir significativamente, pelo que se torna necessário corrigir o procedimento de cálculo de $(kA)_{\text{sl}}$. Na secção seguinte, indica-se a alteração introduzida no cálculo de $(kA)_{\text{sl}}$, e apresentam-se os valores determinados de $(kA)_{\text{sl}}$, para os diferentes orifícios, caudais de borbulhamento e alturas de líquido na coluna.

5.3.2 Coeficiente de transferência de massa relativo à superfície livre do líquido

Para determinar isoladamente o coeficiente de transferência relativo à superfície livre do líquido, $(kA)_{\text{sl}}$, foram realizados ensaios (tipo B), em que borbulhava azoto na coluna com o orifício, e em que se limitou a transferência do oxigénio do ar para a água, apenas à superfície livre do líquido. No seio da coluna, ocorria transferência de oxigénio da água para

a corrente de azoto. Na secção 2.3.2, definiu-se a taxa global de transferência de oxigénio para o líquido, em toda a coluna, nesta situação, como

$$\dot{n} = \left[(kA)_f + (ka^*)_s h + (kA)_r \right] (0 - C) + (kA)_{sl} (C^* - C) \quad (2.9)$$

A equação (2.9) deverá agora ser substituída por

$$\dot{n} = \left[(kA)_f + (ka^*)_s h + (kA)_r + (kA)_{mb}^d \right] (0 - C) + (kA)_{sl} (C^* - C) \quad (2.9.a)$$

Considerando que, para as mesmas condições de operação, $(kA)_{sl}$ deve ser idêntico, quando ocorre transferência de oxigénio do ar para a água (*absorção*) ou da água para azoto (*desabsorção*), e como $\left[(kA)_f + (ka^*)_s h + (kA)_r + (kA)_{mb}^d \right] = (kA)_{global}^d - (kA)_{sl}$, vem

$$\dot{n} = (kA)_{global}^d (0 - C) + (kA)_{sl} C^* \quad (2.10.a)$$

Relembrando que, em cada ensaio, se determinava $\dot{n}$, experimentalmente, como

$$\dot{n} = \dot{v}_L (C - C_e) \quad (2.6)$$

obtém-se, finalmente,

$$(kA)_{sl} = \frac{\dot{v}_L (C - C_e) + (kA)_{global}^d C}{C^*} \quad (2.11.a)$$

sendo $(kA)_{global}^d$ o coeficiente global de desabsorção de oxigénio, determinado a partir dos resultados dos ensaios de desabsorção (tipo C), realizados para condições experimentais idênticas.

A equação (2.11.a) substitui, assim, a equação (2.11), obtida a partir do pressuposto (incorrecto) de que o coeficiente global de absorção de oxigénio seria igual ao de desabsorção, para os mesmos orifício, caudal de borbulhamento e altura de líquido na coluna.

A partir dos resultados dos ensaios tipo B (tabelas B.1.7 a B.1.12) e tipo C (tabelas B.1.13 a B.1.18), e por utilização da equação (2.11.a), determinaram-se, para cada um dos orifícios, os valores de $(kA)_{sl}$, para os vários caudais de gás e alturas de líquido no borbulhador, com e sem anti-espuma. Os resultados relativos aos três orifícios apresentam-se nos gráficos das figuras 5.4 a 5.6 (água) e 5.7 a 5.9 (água com Fumexol 0,02% v/v).

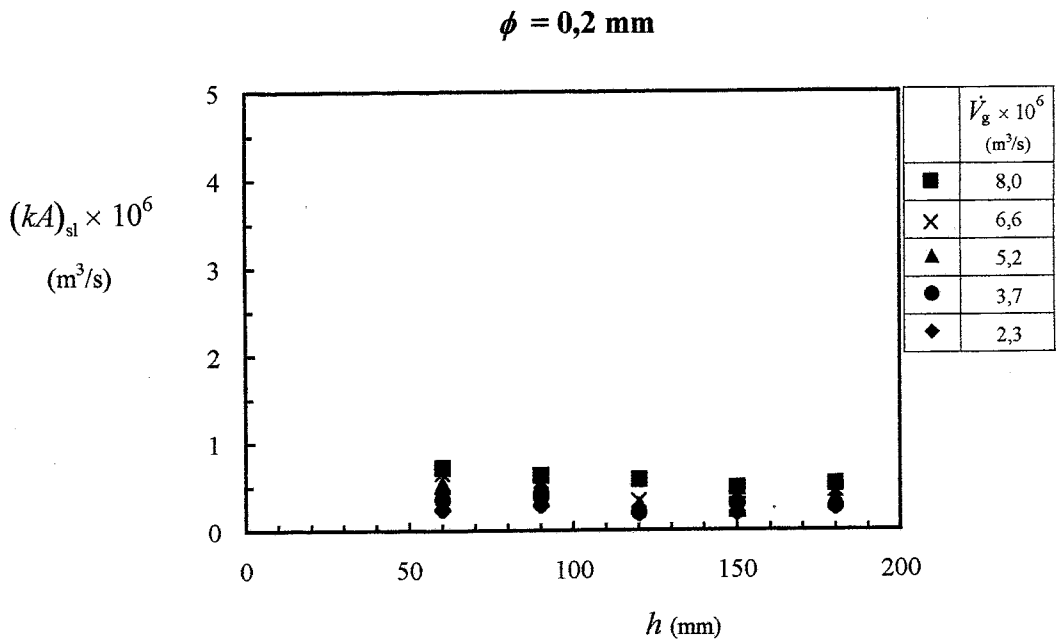


Figura 5.4 - Representação do coeficiente de transferência de oxigénio através da superfície livre do líquido, $(kA)_{sl}$, em função da altura de líquido na coluna, h , para vários caudais de borbulhamento e para o orifício de 0,2 mm (água sem aditivos)

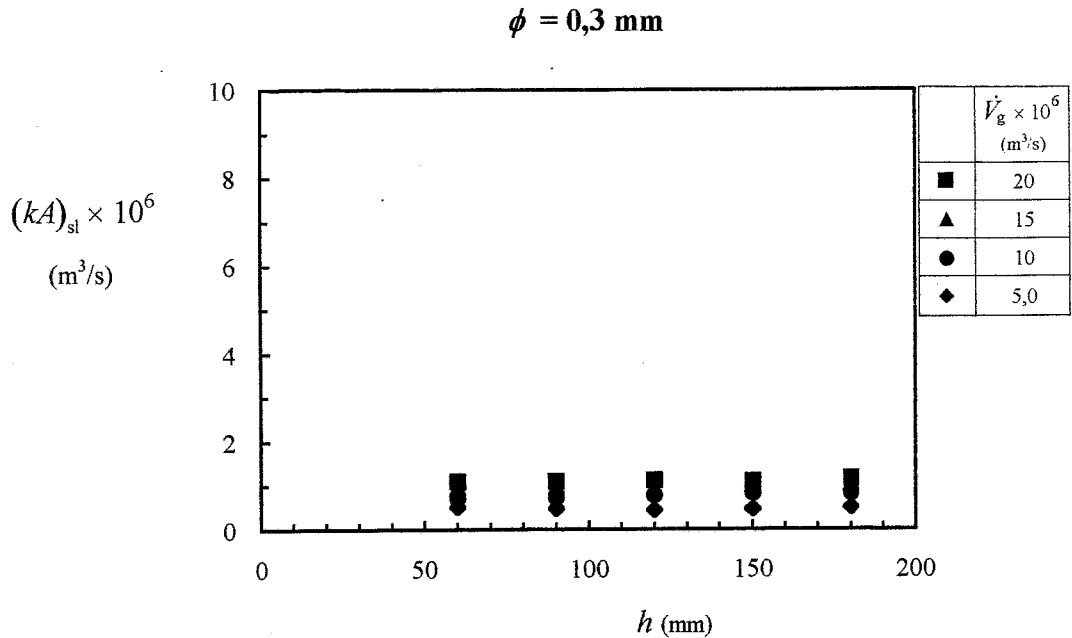


Figura 5.5 - Representação do coeficiente de transferência de oxigênio através da superfície livre do líquido, $(kA)_{sl}$, em função da altura de líquido na coluna, h , para vários caudais de borbulhamento e para o orifício de 0,3 mm (água sem aditivos)

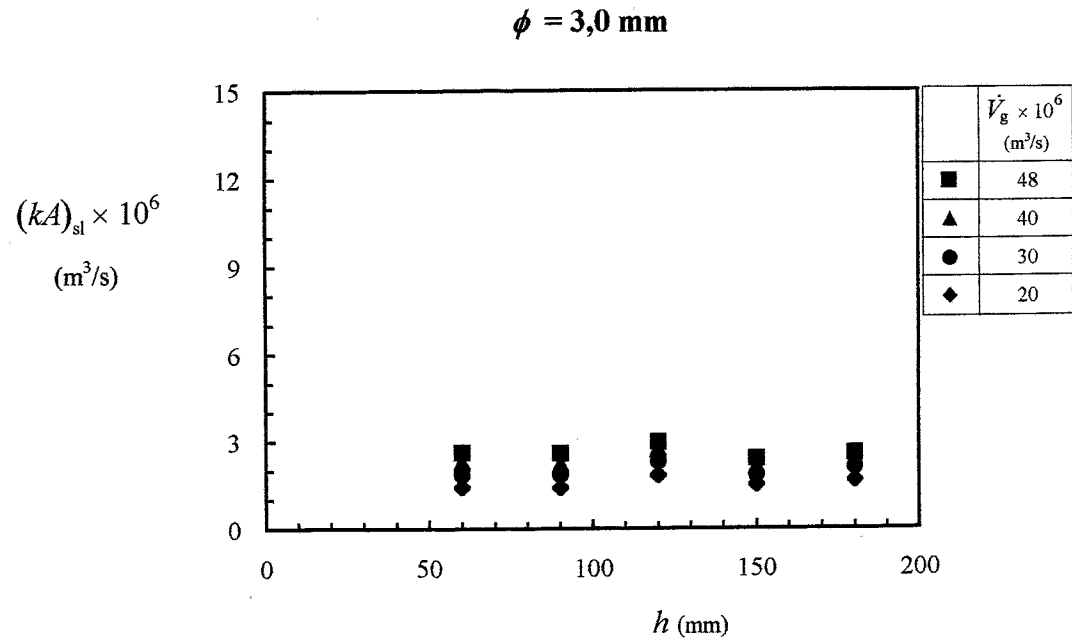


Figura 5.6 - Representação do coeficiente de transferência de oxigênio através da superfície livre do líquido, $(kA)_{sl}$, em função da altura de líquido na coluna, h , para vários caudais de borbulhamento e para o orifício de 3,0 mm (água sem aditivos)

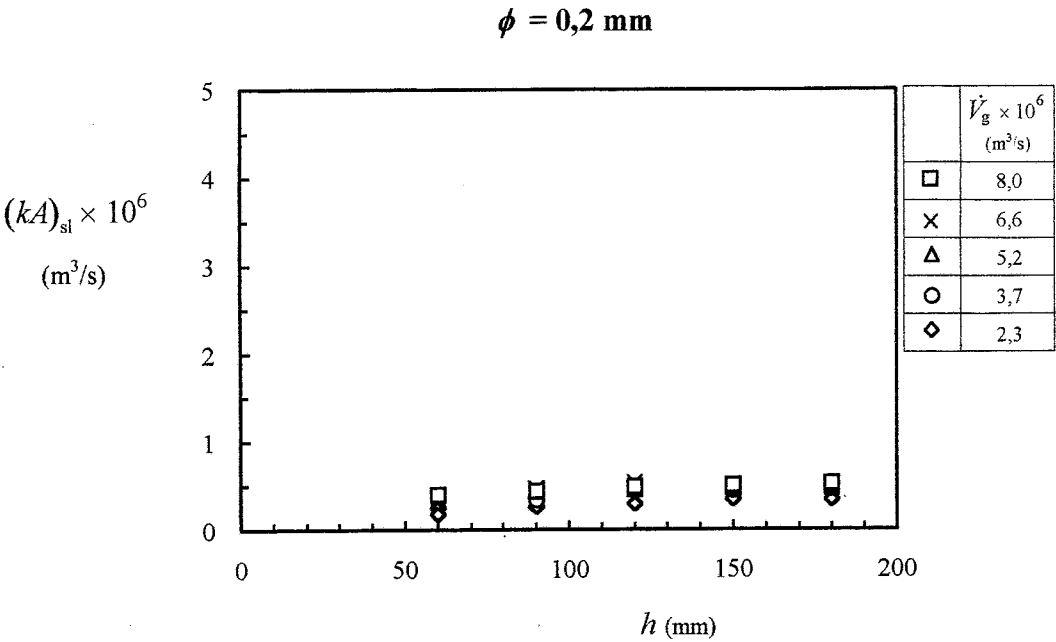


Figura 5.7 - Representação do coeficiente de transferência de oxigênio através da superfície livre do líquido, $(kA)_{sl}$, em função da altura de líquido na coluna, h , para vários caudais de borbulhamento e para o orifício de 0,2 mm (água com Fumexol 0,02% v/v)

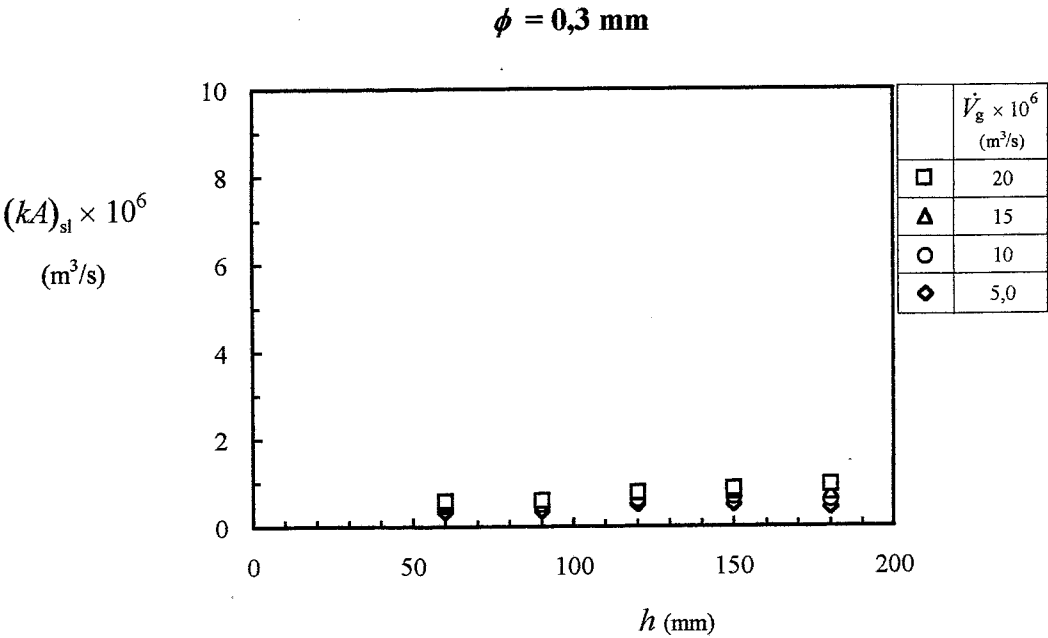


Figura 5.8 - Representação do coeficiente de transferência de oxigênio através da superfície livre do líquido, $(kA)_{sl}$, em função da altura de líquido na coluna, h , para vários caudais de borbulhamento e para o orifício de 0,3 mm (água com Fumexol 0,02% v/v)

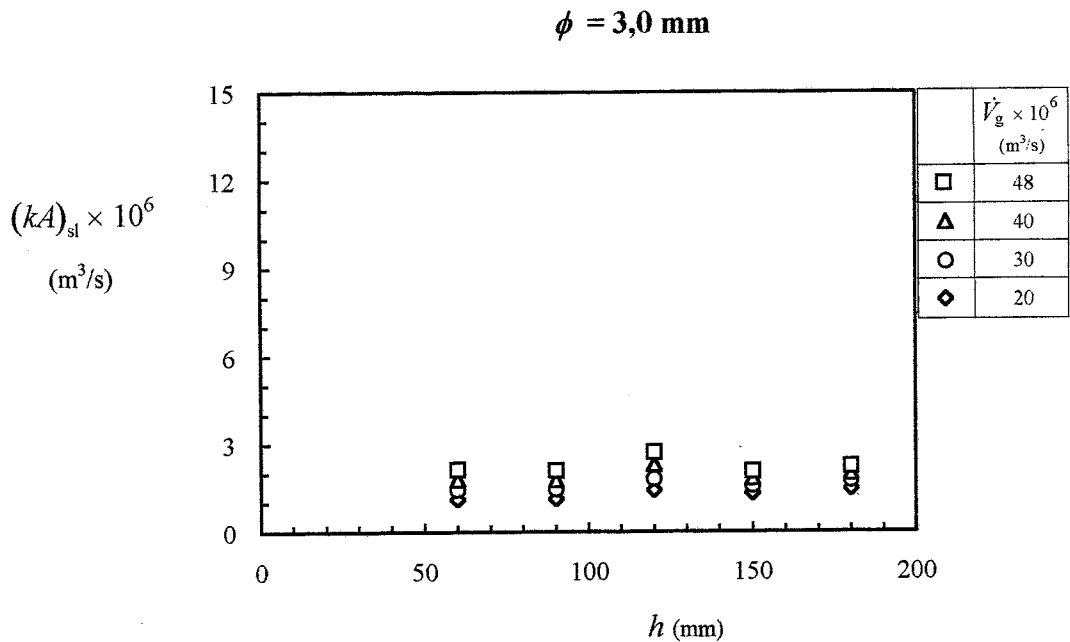


Figura 5.9 - Representação do coeficiente de transferência de oxigénio através da superfície livre do líquido, $(kA)_{sl}$, em função da altura de líquido na coluna, h , para vários caudais de borbulhamento e para o orifício de 3,0 mm (água com Fumexol 0,02% v/v)

Para qualquer dos orifícios utilizados, constata-se que $(kA)_{sl}$ é fundamentalmente independente da altura de líquido no borbulhador, para a gama completa de alturas.

Os valores de $(kA)_{sl}$ aumentam, invariavelmente, com o caudal de gás, para todos os orifícios, com e sem anti-espuma. Isto é justificado pela influência incontestável e directa do caudal de borbulhamento na taxa de renovação da superfície livre.

Relativamente aos coeficientes globais de transferência de oxigénio do ar para a água (sem aditivos), os valores de $(kA)_{sl}$ podem representar entre 10 e 25% dos correspondentes valores de $(kA)_{global}$, para o orifício de 0,2 mm, entre 13 e 35%, para o orifício de 0,3 mm, e entre 21 e 40%, para o de 3,0 mm. É importante não esquecer que as gamas de caudais utilizadas para os três orifícios são diferentes, correspondendo, aos orifícios maiores, caudais de borbulhamento mais elevados e consequentemente, maiores taxas de renovação da superfície livre. Justifica-se, assim, o aumento da importância relativa dos valores de $(kA)_{sl}$, do menor para o maior orifício.

Os valores de $(kA)_{sl}$ relativos aos ensaios feitos com anti-espuma são, na generalidade, inferiores aos valores obtidos em água sem anti-espuma. As diferenças são mais acentuadas para os caudais de borbulhamento mais baixos (utilizados com os orifícios de 0,2 e 0,3 mm). Uma explicação plausível é que, com a adição de anti-espuma à água as moléculas do aditivo são adsorvidas nas interfaces líquido-gás, pelo que a taxa de renovação da superfície livre do líquido, para caudais de gás mais reduzidos, não é suficientemente eficaz para afastar as moléculas de anti-espuma. Esse efeito de “barreira” conduz a taxas inferiores de transferência dos solutos (oxigénio) através da superfície livre do líquido. Para caudais de borbulhamento mais elevados (utilizados com o orifício de 3,0 mm), a concentração de moléculas de anti-espuma junto à superfície livre torna-se menor, devido ao movimento mais intenso das correntes de líquido que renovam continuamente a superfície do líquido.

5.3.3 Coeficientes de transferência de massa relativos à formação, subida e bolhas retidas junto à superfície livre do líquido

i) Absorção de oxigénio

Com os valores recalculados de $(kA)_{sl}$, para os diferentes orifícios, caudais de borbulhamento e alturas de líquido na coluna de borbulhamento, sem e com anti-espuma, determinaram-se os correspondentes valores de $\left[(kA)_{global} - (kA)_{sl}\right]$, que se representam nos gráficos das figuras 5.10 a 5.15. Segundo a reformulação do modelo teórico de transferência de massa, proposta na secção 5.3.1, $\left[(kA)_{global} - (kA)_{sl}\right] = \left[(kA)_f + (ka^*)_s h + (kA)_r + (kA)_{mb}\right]$. Nos ensaios feitos com adição de anti-espuma à água (figuras 5.13 a 5.15), como a transferência através das bolhas *retidas* sob a superfície livre do líquido é minimizada, fica apenas $\left[(kA)_{global} - (kA)_{sl}\right] = \left[(kA)_f + (ka^*)_s h + (kA)_{mb}\right]$.

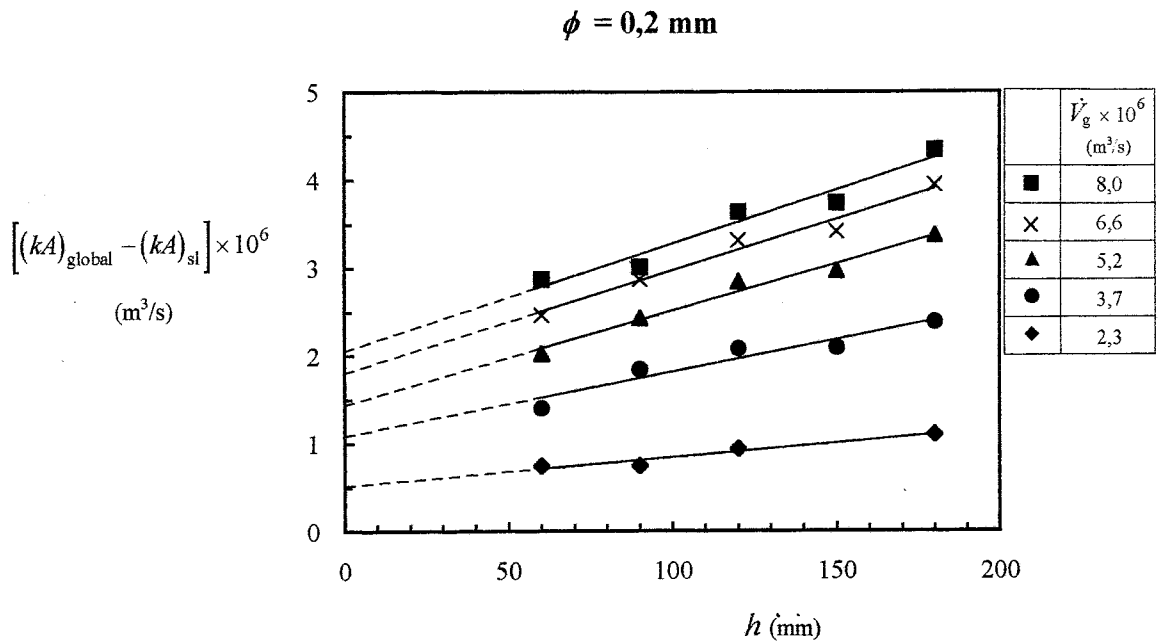


Figura 5.10 - Representação de $\left[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}\right]$ em função da altura de líquido no borbulhador, h , para vários caudais de gás e para o orifício de 0,2 mm (água sem aditivos)

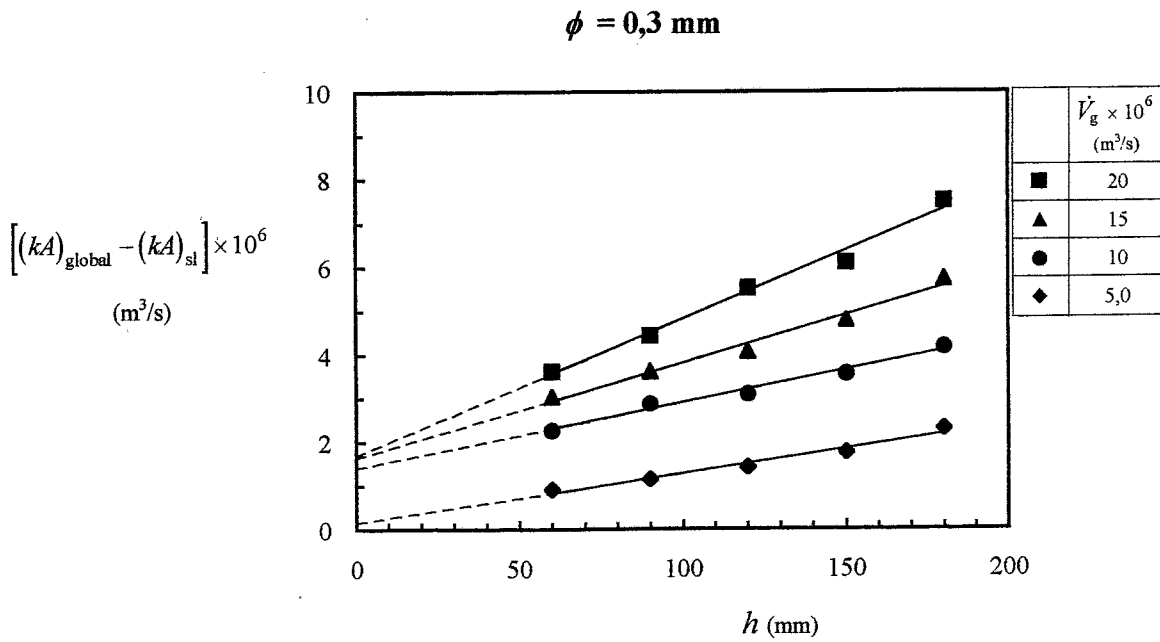


Figura 5.11 - Representação de $\left[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}\right]$ em função da altura de líquido no borbulhador, h , para vários caudais de gás e para o orifício de 0,3 mm (água sem aditivos)

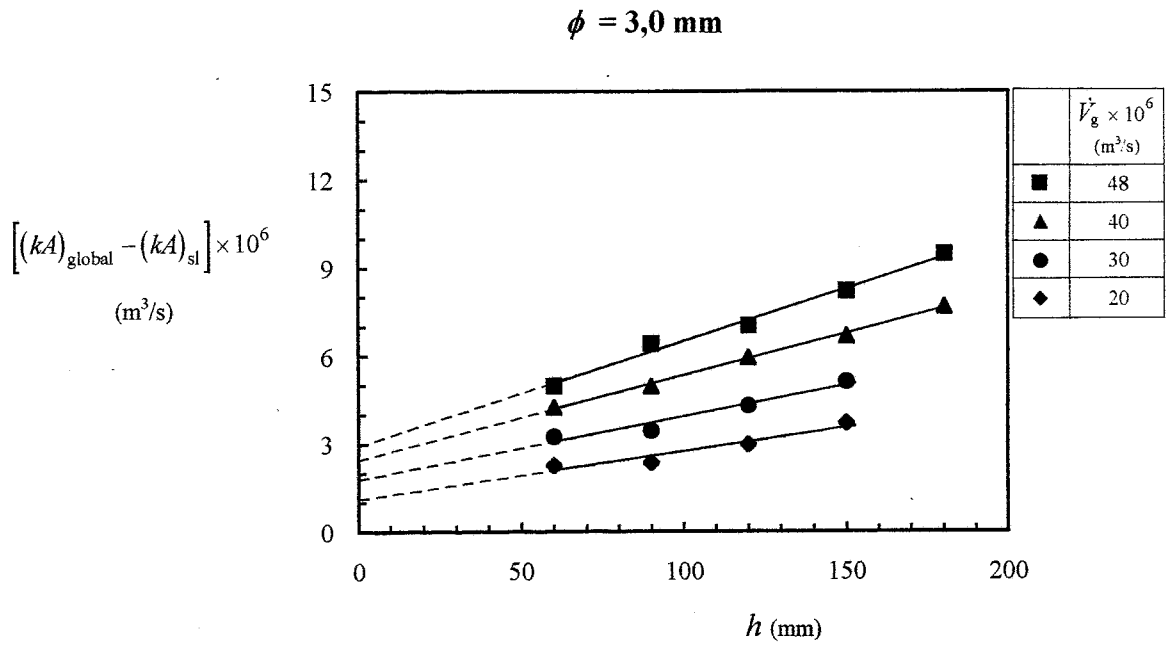


Figura 5.12 - Representação de $\left[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}} \right]$ em função da altura de líquido no borbulhador, h , para vários caudais de gás e para o orifício de 3,0 mm (água sem aditivos)

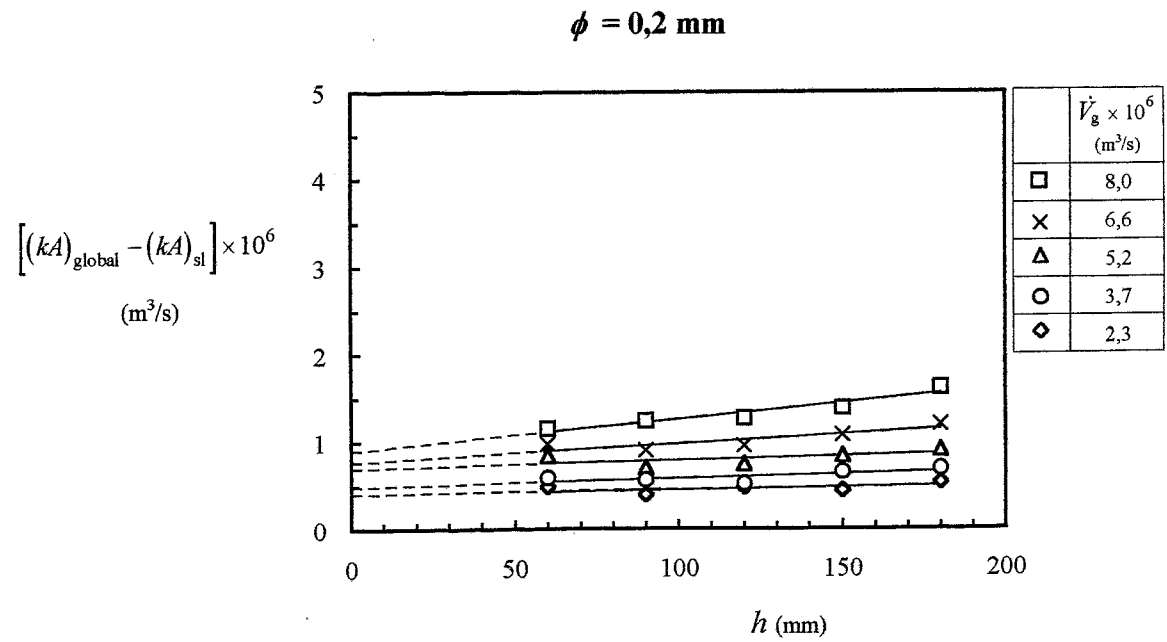


Figura 5.13 - Representação de $\left[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}} \right]$ em função da altura de líquido no borbulhador, h , para vários caudais de gás, e para o orifício de 0,2 mm (água com Fumexol 0,02% v/v)

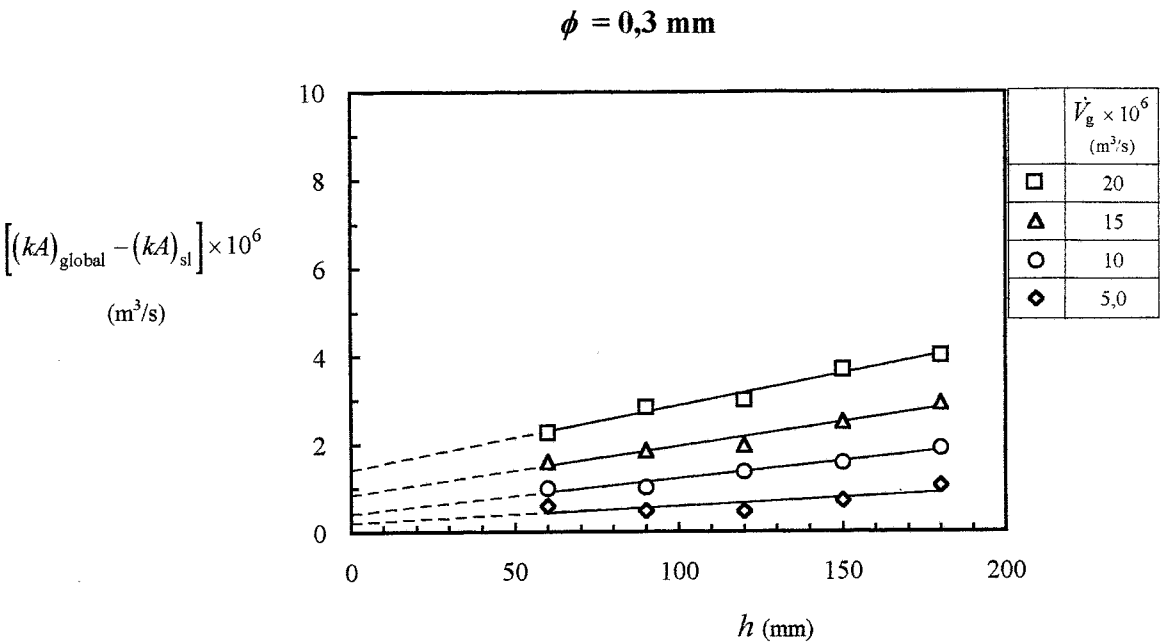


Figura 5.14 - Representação de $\left[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}} \right]$ em função da altura de líquido no borbulhador, h , para vários caudais de gás, e para o orifício de 0,3 mm (água com Fumexol 0,02% v/v)

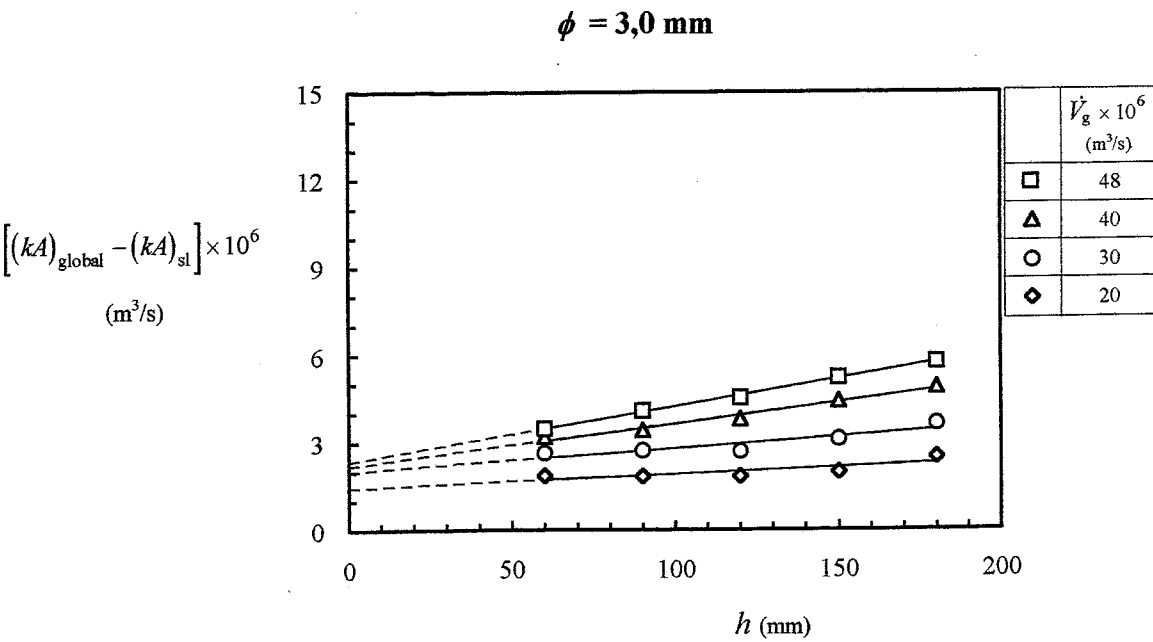


Figura 5.15 - Representação de $\left[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}} \right]$ em função da altura de líquido no borbulhador, h , para vários caudais de gás, e para o orifício de 3,0 mm (água com Fumexol 0,02% v/v)

Os gráficos das figuras 5.10 a 5.15 mostram que a variação de $\left[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}\right]$ com a altura de líquido na coluna, h , continua a ser linear, independentemente da correcção dos valores de $(kA)_{\text{sl}}$. Dado que os “novos” valores de $(kA)_{\text{sl}}$ (equação 2.11.a) não diferem em mais do que 33% dos calculados pela equação (2.11), os valores de $\left[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}\right]$ representados nos gráficos das figuras 5.10 a 5.15 não são substancialmente diferentes dos valores apresentados no Capítulo 2 (figuras 2.30 a 2.35).

Os valores dos declives e das ordenadas na origem das rectas de ajuste dos pontos experimentais representados nos gráficos 5.10 a 5.12 (água sem aditivos) e 5.13 a 5.15 (água com anti-espuma) apresentam-se nas tabelas 5.1 e 5.2, respectivamente.

Tabela 5.1 - Valores do declive e da ordenada na origem das rectas de ajuste de $\left[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}\right]$ em função de h (água sem aditivos)

ϕ	$\dot{V}_g \times 10^6$	declive $\times 10^4$	ord. origem $\times 10^6$
(mm)	(m ³ /s)	(m ² /s)	(m ³ /s)
0,2	2,3	0,033	0,518
	3,7	0,073	1,084
	5,2	0,107	1,438
	6,6	0,117	1,804
	8,0	0,122	2,053
0,3	5,0	0,112	0,162
	10	0,149	1,405
	15	0,218	1,635
	20	0,313	1,683
3,0	20	0,164	1,105
	30	0,215	1,775
	40	0,287	2,461
	48	0,359	2,925

Tabela 5.2 - Valores do declive e da ordenada na origem das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h (água com Fumexol 0,02% v/v)

ϕ	$\dot{V}_g \times 10^6$	declive $\times 10^4$	ord. origem $\times 10^6$
(mm)	(m ³ /s)	(m ² /s)	(m ³ /s)
0,2	2,3	0,005	0,408
	3,7	0,010	0,485
	5,2	0,009	0,696
	6,6	0,021	0,770
	8,0	0,037	0,894
0,3	5,0	0,038	0,212
	10	0,079	0,421
	15	0,111	0,842
	20	0,146	1,417
3,0	20	0,047	1,458
	30	0,080	2,023
	40	0,146	2,206
	48	0,190	2,340

Quando se comparam os resultados da tabela 5.1 (água sem aditivos) com os resultados da tabela 5.2 (água com anti-espuma), regista-se, tal como já se vira no Capítulo 2, uma diminuição sensível dos valores do declive das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$, na presença de anti-espuma.

Independentemente das diferenças que possam existir entre a contribuição das microbolhas na taxa de transferência de oxigénio, sem e com anti-espuma, a adição de anti-espuma à água traduz-se numa diferença significativa na morfologia do borbulhamento na coluna, que é mais evidente para os orifícios de menor tamanho (figuras 2.15 e 2.16, 2.17 e 2.18, 2.19 e 2.20, 2.21 e 2.22). A presença de anti-espuma promove intensamente a coalescência entre as bolhas. Nota-se, para qualquer valor do caudal, uma diminuição efectiva do número de bolhas na coluna, passando portanto as bolhas a ter dimensões muito maiores. O mecanismo responsável por este efeito, que é o mesmo que provoca o rebentamento rápido

das bolhas à superfície (objectivo da adição de anti-espuma, neste trabalho) resulta da adsorção de moléculas do composto, que vão criar gradientes de tensão superficial na superfície da bolha. A espessura do filme de líquido é de tal forma reduzida, que a bolha rebenta espontaneamente. Este mecanismo pode ser acompanhado da diminuição da viscosidade da película de líquido tangencial à bolha, que é rompida mais facilmente (Davies e Rideal, 1963). A adsorção de moléculas de anti-espuma é mais eficaz em bolhas de menor tamanho. Por esse facto, justifica-se que para o orifício de 3,0 mm, em que se formam bolhas consideravelmente maiores, e em que os caudais utilizados são também mais elevados, proporcionando tempos menores de contacto gás-líquido, o efeito do anti-espuma não se traduza em diferenças visíveis nas características do borbulhamento (figuras 2.23 e 2.24, 2.25 e 2.26). Neste caso, serão as bolhas de menor tamanho presentes no líquido e, em particular, as microbolhas que deverão ser responsabilizadas pela diminuição da taxa de transferência de oxigénio por unidade de altura de líquido, na presença de anti-espuma.

Quanto aos valores das ordenadas na origem, eles diminuem significativamente com a adição de anti-espuma à água, para caudais de borbulhamento inferiores a $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, o que se justifica, em grande medida, pela “eliminação” das bolhas retidas junto à superfície livre do líquido, para aquela gama de caudais.

Os valores do declive das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , relativos aos ensaios feitos com água sem anti-espuma (tabela 5.1) são representados, em função do caudal de gás, $\dot{V}_g$, no gráfico da figura 5.16, em que também se representam os valores previstos do coeficiente de transferência relativo à subida das bolhas, $(ka^*)_s$, determinados na secção 2.5.4 (tabela 2.5). Para os valores do caudal de borbulhamento utilizados com os orifícios de 0,2 e 0,3 mm, os valores estimados de $(ka^*)_s$ representados no gráfico da figura 5.16, foram obtidos a partir dos valores de k_s previstos pela equação (2.18). Para os valores do caudal de borbulhamento utilizados com o orifício de 3,0 mm, os valores (estimados) de $(ka^*)_s$ representados foram obtidos a partir dos valores de k_s previstos pela equação (2.25). Usa-se como ordenada do gráfico da figura 5.16 o “declive” das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , e não simplesmente $(ka^*)_s$, porque o declive das

rectas pode incluir, em si, a contribuição das microbolhas ou, pelo menos, uma parte dela. Esta possibilidade será analisada mais adiante.

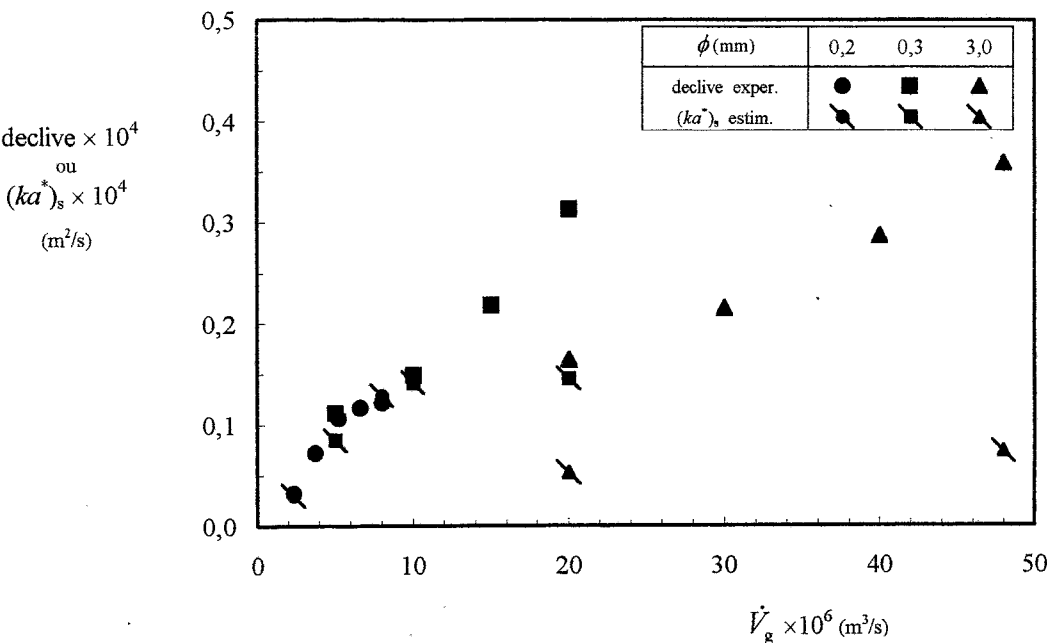


Figura 5.16 - Declive das rectas de ajuste de $[(ka)_{\text{global}} - (ka)_{\text{sl}}]$ versus h , e valores estimados de $(ka^*)_s$ (tabela 2.5) em função do caudal de gás, $\dot{V}_g$ (absorção de oxigénio em água sem aditivos)

Pela análise do gráfico da figura 5.16, constata-se que, para cada um dos orifícios utilizados, a transferência de oxigénio, por unidade de altura de coluna de líquido, aumenta com o caudal de borbulhamento, $\dot{V}_g$. Comparando os valores relativos aos dois orifícios de menor tamanho, não se observam diferenças significativas entre os valores do declive obtidos para caudais idênticos, podendo dizer-se que a tendência de variação do declive com o caudal de borbulhamento, para o orifício de 0,2 mm, é mantida pelos valores correspondentes ao orifício de 0,3 mm. No entanto, ao passar para o orifício de 3,0 mm, há uma redução nítida dos valores do declive, relativamente à tendência apresentada pelos valores obtidos para o

orifício de 0,3 mm. Para o caudal de $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, o valor do declive, para o orifício de 0,3 mm, é cerca de 50% superior ao obtido, para esse mesmo caudal, com o orifício de 3,0 mm, sendo ainda superior ao valor que se obtém, com o orifício de 3,0 mm, para um caudal de borbulhamento duas vezes maior ($40 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$). Para um mesmo caudal de gás, no orifício de 3,0 mm formam-se bolhas de maior tamanho e, portanto, em menor número, do que no orifício de 0,3 mm (figuras 2.21 e 2.23). A área interfacial (por unidade de altura de líquido) será portanto significativamente superior, quando se utiliza o orifício de 0,3 mm.

O afastamento entre os valores experimentais do declive das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , e os valores estimados de $(ka^*)_{\text{s}}$, é notório para os caudais de borbulhamento mais elevados ($\dot{V}_{\text{g}} \geq 20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$), utilizados com o orifício de 3,0 mm. Este afastamento poderá, em parte, ser justificado pelo facto de a estimativa da área interfacial por unidade de altura de líquido (a_{s}^* ou a_{es}^*) ter sido feita contabilizando apenas as bolhas “grandes” presentes na coluna. Pelas fotografias das figuras 2.23 e 2.25, respeitantes a estas condições, pode ver-se que existe no líquido um número significativo de bolhas de pequeno tamanho, resultantes da coalescência e rebentamento das bolhas maiores, e que contribuem certamente para um aumento de a_{s}^* .

No gráfico da figura 5.17 representam-se, também em função do caudal de borbulhamento, os valores das ordenadas na origem das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ versus h , correspondentes aos ensaios feitos em água com anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v), e os valores do coeficiente de transferência de massa relativo à formação das bolhas, $(kA)_{\text{f}}$, previstos pela equação (2.29).

Com a adição de anti-espuma à água, esperava-se que as ordenadas na origem das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , obtidas nestas condições, pudessem representar basicamente os coeficientes de transferência de massa relativos à formação das bolhas, $(kA)_{\text{f}}$.

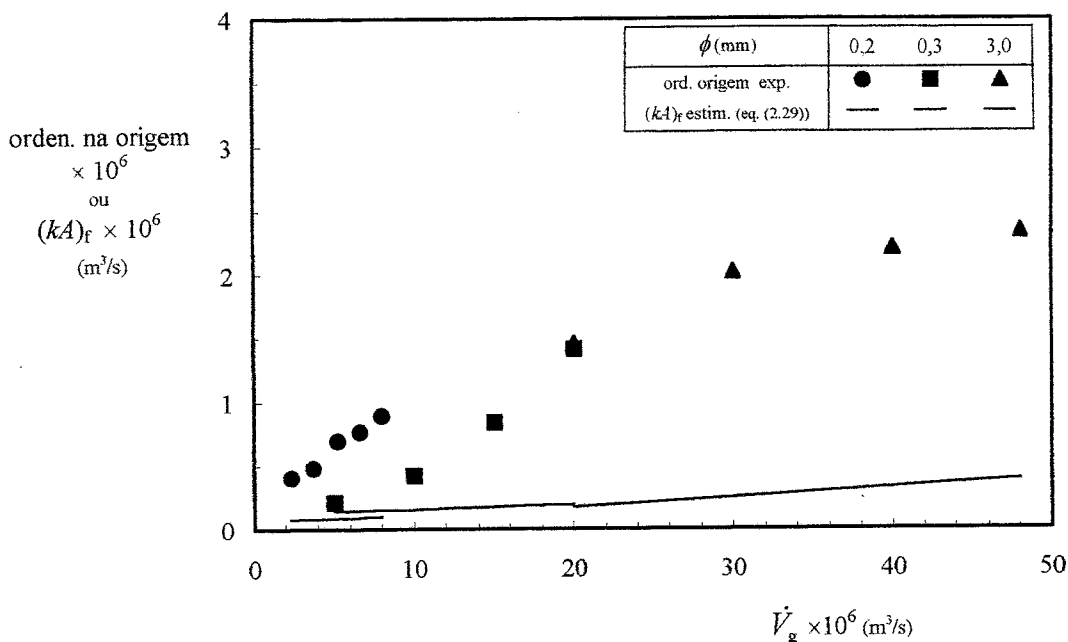


Figura 5.17 - Ordenada na origem das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ versus h , e valores estimados de $(kA)_f$ (eq. (2.29)), em função do caudal de gás, $\dot{V}_g$ (absorção de oxigénio em água com Fumexol 0,02% v/v)

O gráfico da figura 5.17 revela (mais uma vez) que as ordenadas na origem das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função da altura de líquido (obtidas em água com anti-espuma) excedem, significativamente, os valores estimados de $(kA)_f$. Já se mostrou, no Capítulo 4 (secção 4.2.2), que fracções muito pequenas ($< 0,3\%$, para todos os casos testados) do caudal de gás, disperso sob a forma de microbolhas, que se dissolvessem na totalidade, poderiam justificar as diferenças entre os valores “verdadeiros” (teóricos) de $(kA)_f$ e os “aparentes” (experimentais), apresentados na tabela 2.6. Esse não será certamente o único mecanismo que provoca um tal afastamento.

A formação de bolhas em orifícios é normalmente acompanhada de uma elevada turbulência na região que circunscreve o orifício. A maior agitação do líquido, os fenómenos de coalescência (e/ou quebra) entre bolhas formadas consecutivamente, junto ao orifício, são factores normalmente apontados para justificar as maiores taxas de transferência determinadas experimentalmente, e que se associam à zona de formação das bolhas

(Clift *et al.*, 1978, Alvarez-Cuenca *et al.*, 1980, Yoshida e Akita, 1965, Deckwer *et al.*, 1974, Deckwer *et al.*, 1980, Deckwer *et al.*, 1983, Shulman e Molstad, 1950). As correlações teóricas, desenvolvidas com base em modelos de formação de bolhas uniformes, ignoram interações entre bolhas consecutivas, conduzindo, por isso, a valores de $(kA)_f$ normalmente mais baixos do que os determinados experimentalmente.

Para os orifícios mais pequenos que foram utilizados neste trabalho, esta pode realmente ser uma das justificações (talvez mesmo a mais importante) para o afastamento entre valores teóricos e experimentais. A ordem de grandeza do número de Weber, We , calculado para o gás, no orifício (valores apresentados na tabela 2.6 do Capítulo 2), é uma indicação do regime, mais ou menos turbulento, de formação das bolhas. Para os orifícios de 0,2 e 0,3 mm, os valores de We situam-se bastante acima do limite ($We = 4$) normalmente indicado para a transição entre a formação, a frequência constante, de bolhas homogêneas, e o designado regime de “jacto”. É, portanto, natural que, nesta situação, as correlações adoptadas (Zheleznyak, 1967, Sherwood *et al.*, 1975) apontem para valores de $(kA)_f$ substancialmente inferiores aos determinados experimentalmente.

No gráfico da figura 5.17, pode observar-se que a variação da ordenada na origem das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função da altura de líquido, com o caudal de borbulhamento, é mais acentuada para os orifícios de 0,2 e 0,3 mm, do que para o orifício de 3,0 mm. A influência do diâmetro do orifício no mecanismo de formação das bolhas determina, certamente, estes resultados.

Para o orifício de 3,0 mm, com o qual foram utilizados caudais de borbulhamento iguais ou superiores a $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, o número de Weber do gás, no orifício, é sempre inferior ou igual a 4. Isso deveria traduzir-se numa maior aproximação entre os valores de $(kA)_f$ previstos pelas correlações propostas e os valores experimentais de $(kA)_f$. No entanto, as ordenadas na origem, representadas no gráfico da figura 5.17, relativas ao orifício de 3,0 mm, afastam-se ainda consideravelmente dos valores previstos de $(kA)_f$. Conclui-se assim que, pelo menos neste caso, a contribuição da transferência de oxigénio através das microbolhas deve ter um papel determinante no acréscimo efectivo da taxa de transferência associada à zona de formação.

Para poder interpretar melhor a contribuição das microbolhas na taxa global de transferência de oxigénio, será útil comparar os resultados de transferência de massa obtidos em absorção e em desabsorção. Nessa perspectiva, apresentam-se seguidamente os valores obtidos de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ calculados a partir dos resultados dos ensaios de *desabsorção* de oxigénio.

ii) Desabsorção de oxigénio

Nas condições dos ensaios experimentais realizados, e para iguais condições de operação, os valores do coeficiente de transferência de massa através da superfície livre, $(kA)_{\text{sl}}$, deverão ser idênticos, em *absorção* e em *desabsorção*.

Assim, os valores de $(kA)_{\text{sl}}$ apresentados na secção 5.3.2 (figuras 5.4 a 5.9) podem ser utilizados para calcular os correspondentes valores de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$, sendo $(kA)_{\text{global}}^d$ o valor do coeficiente global de desabsorção de oxigénio, determinado em condições experimentais idênticas. Em água sem anti-espuma, por exemplo, a diferença $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}](\text{desabsorção})$ inclui, da mesma forma que em *absorção*, a contribuição para a taxa global de transferência das bolhas em *formação*, das bolhas em *subida* na coluna de líquido, das bolhas *retidas* sob a superfície livre do líquido e, ainda, a possível contribuição das *microbolhas*.

Os valores de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$, assim obtidos, para os orifícios de 0,3 mm e 3,0 mm, foram representados, graficamente, em função de h , nas figuras 5.18 e 5.19 (água sem aditivos), e 5.20 e 5.21 (água com Fumexol 0,02% v/v).

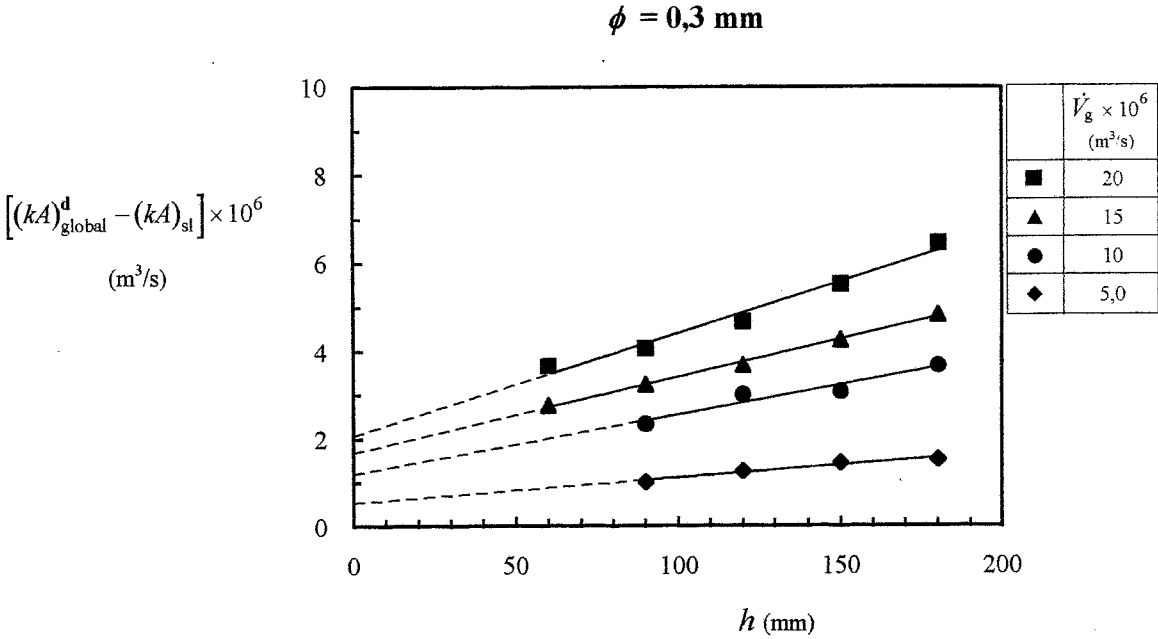


Figura 5.18 - Representação de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ em função da altura de líquido no borbulhador, h , para vários caudais de gás e para o orifício de 0,3 mm (água sem aditivos)

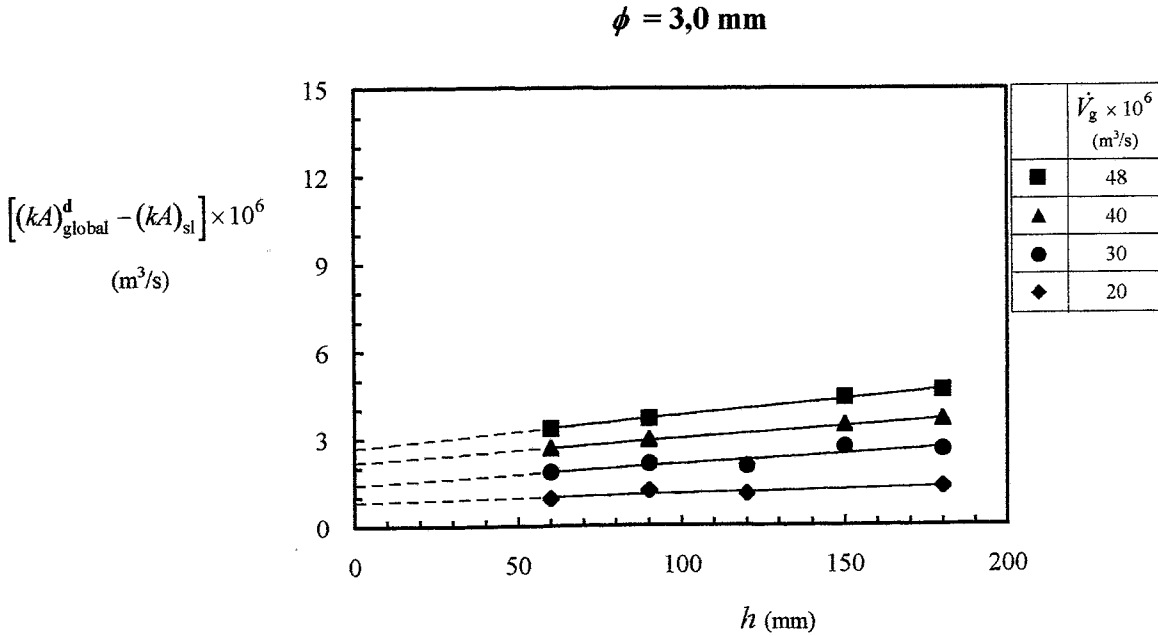


Figura 5.19 - Representação de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ em função da altura de líquido no borbulhador, h , para vários caudais de gás e para o orifício de 3,0 mm (água sem aditivos)

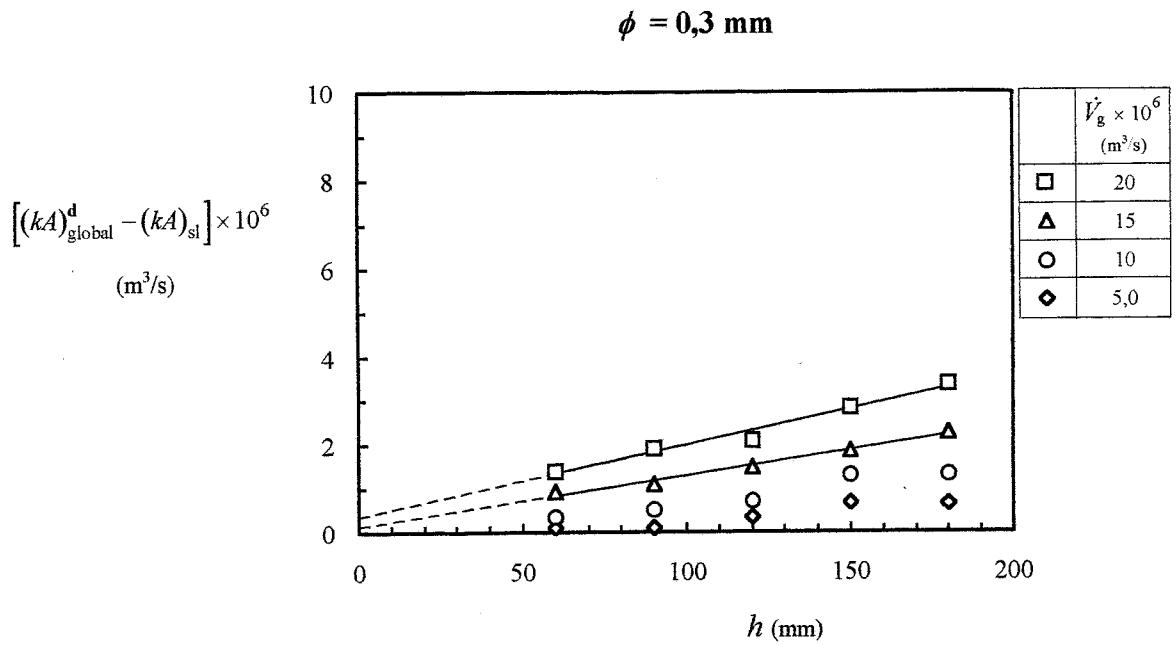


Figura 5.20 - Representação de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ em função da altura de líquido no borbulhador, h , para vários caudais de gás e para o orifício de 0,3 mm (água com Fumexol 0,02% v/v)

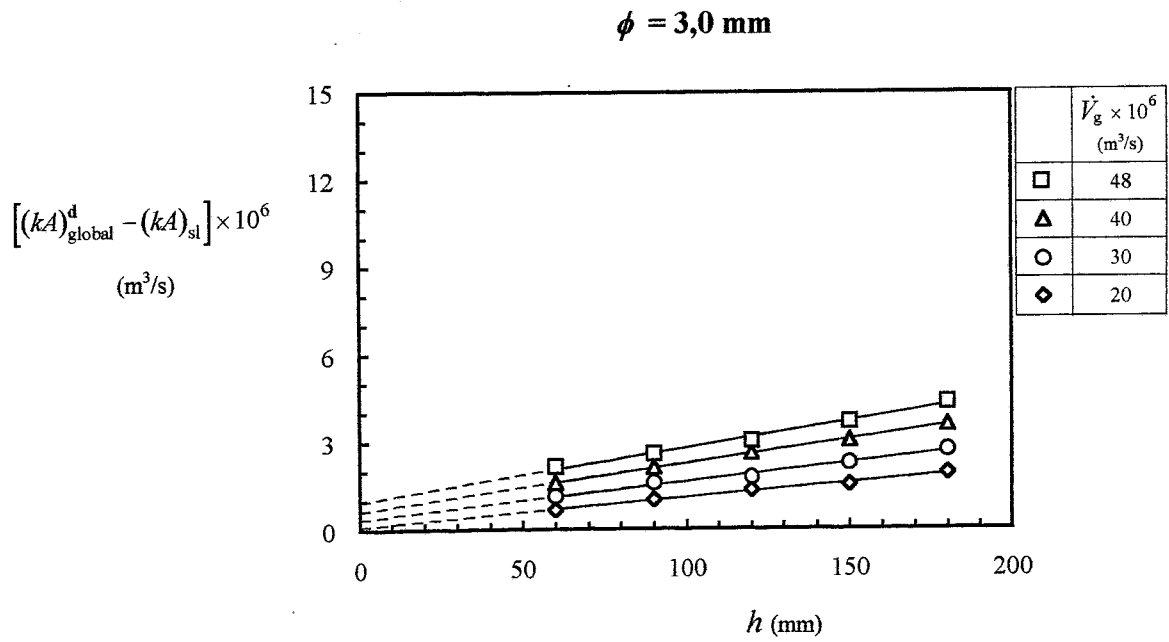


Figura 5.21 - Representação de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ em função da altura de líquido no borbulhador, h , para vários caudais de gás e para o orifício de 3,0 mm (água com Fumexol 0,02% v/v)

Como se pode ver pelos gráficos das figuras 5.18 a 5.21, a variação de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ com h é (também) linear, podendo determinar-se o declive e a ordenada na origem da melhor recta de ajuste dos pontos experimentais. Os valores obtidos para esses parâmetros apresentam-se nas tabela 5.3 (água sem aditivos) e 5.4 (água com anti-espuma).

Tabela 5.3 - Valores do declive e da ordenada na origem das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h (água sem aditivos)

ϕ	$\dot{V}_g \times 10^6$	declive $\times 10^4$	ord. origem $\times 10^6$
(mm)	(m ³ /s)	(m ² /s)	(m ³ /s)
0,3	5,0	0,066	0,601
	10	0,144	1,492
	15	0,179	1,596
	20	0,239	2,018
3,0	20	0,024	0,840
	30	0,066	1,438
	40	0,075	2,249
	48	0,102	2,755

Tabela 5.4 - Valores do declive e da ordenada na origem das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h (água com Fumexol 0,02% v/v)

ϕ	$\dot{V}_g \times 10^6$	declive $\times 10^4$	ord. origem $\times 10^6$
(mm)	(m ³ /s)	(m ² /s)	(m ³ /s)
0,3	15	0,124	0,051
	20	0,164	0,451
3,0	20	0,099	0,094
	30	0,122	0,461
	40	0,157	0,689
	48	0,186	0,956

Os resultados apresentados nas tabelas 5.3 e 5.4 mostram, de novo, uma diminuição significativa dos valores das ordenadas na origem das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , com a adição de anti-espuma à água, para qualquer dos orifícios e para toda a gama de caudais de borbulhamento. Pode ainda observar-se que a diminuição dos valores das ordenadas na origem, com a adição de anti-espuma, é mais significativa em desabsorção (tabelas 5.3 e 5.4) do que em absorção (tabelas 5.1 e 5.2).

Os valores dos declives das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para o orifício de 0,3 mm, não parecem ser tão afectados, como em absorção, pela adição de anti-espuma, e, curiosamente, para o orifício de 3,0 mm, os valores dos declives são mesmo superiores em água com anti-espuma. O porquê deste aparente contra-senso será analisado mais adiante.

A comparação dos valores dos declives e das ordenadas na origem relativos a *desabsorção* com os valores dos declives e das ordenadas na origem obtidos para *absorção*, em condições idênticas, poderá dar uma informação relevante sobre a contribuição das microbolhas. Analisar-se-ão, em primeiro lugar, os resultados obtidos em água *com* anti-espuma (em que se minimiza a transferência através das bolhas retidas sob a superfície livre) e, posteriormente, os resultados obtidos em água *sem* anti-espuma.

iii) Comparação dos resultados de absorção e desabsorção de oxigénio

- Água com anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v)

No gráfico da figura 5.22, representam-se os valores dos declives das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ (*absorção*) e de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ (*desabsorção*) versus h , em função do caudal de borbulhamento, $\dot{V}_g$. No gráfico da figura 5.23, representam-se os valores das ordenadas na origem dessas mesmas rectas, em função de $\dot{V}_g$, e, ainda, os valores de $(kA)_f$ previstos pela equação (2.29).

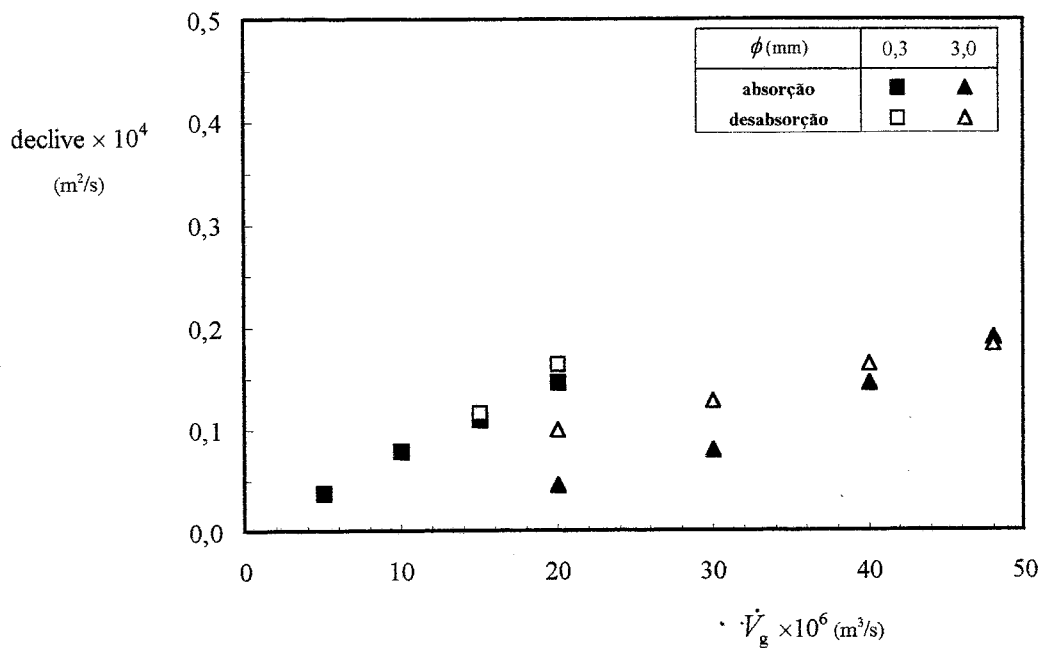


Figura 5.22 - Declive das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ e de $[(kA)_{\text{global}}^{\text{d}} - (kA)_{\text{sl}}]$ versus h , em função de $\dot{V}_g$ (água com Fumexol 0,02% v/v)

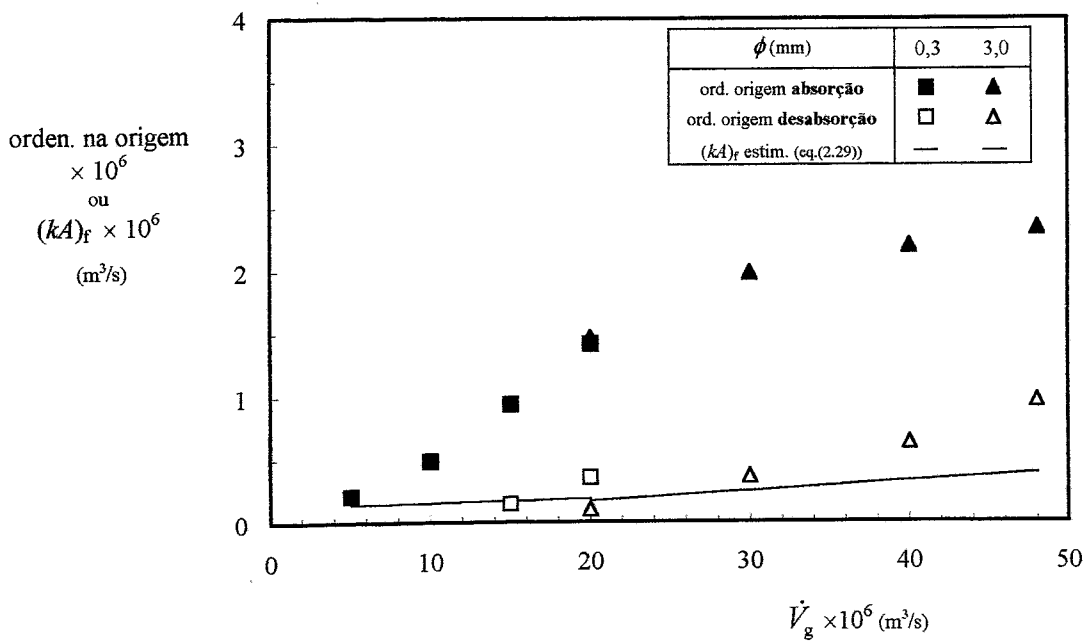


Figura 5.23 - Ordenada na origem das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ e de $[(kA)_{\text{global}}^{\text{d}} - (kA)_{\text{sl}}]$ versus h , em função de $\dot{V}_g$ (água com Fumexol 0,02% v/v)

Quando se borbulha ar ou azoto em água, o mecanismo de borbulhamento é idêntico, dadas as semelhanças entre os dois sistemas. Isto quer dizer que, considerando a transferência de massa através das bolhas em formação, em ascensão no líquido, retidas sob a superfície livre ou mesmo através da superfície livre do líquido, ela deve ser independente do sentido do débito de massa. Os coeficientes respectivos de transferência de oxigénio do ar para a água, (absorção) ou da água para o azoto (desabsorção) deverão por isso ser muito próximos, em condições experimentais idênticas. As diferenças verificadas nas duas situações (absorção e desabsorção) terão que ser justificadas, então, pela diferente contribuição das microbolhas, num e noutro caso.

Ao observar os gráficos das figuras 5.22 e 5.23, há três aspectos que sobressaem: a semelhança entre os valores dos declives em *absorção* e em *desabsorção* (figura 5.22), o afastamento entre os valores das ordenadas na origem relativas a *absorção* e a *desabsorção* (figura 5.23) e, finalmente, a proximidade entre os valores das ordenadas na origem obtidos em *desabsorção* e os valores previstos de $(kA)_f$.

Para que este “cenário” ocorra, basta que uma pequena fracção do caudal de gás se disperse sob a forma de microbolhas suficientemente pequenas para se dissolverem totalmente, num curto intervalo de tempo. A taxa de absorção de oxigénio aumenta e a taxa de desabsorção de oxigénio não sofre grandes alterações, tendendo para o valor teórico calculado a partir de $(kA)_f$.

A análise destes resultados será retomada novamente, depois de se ver o que acontece em água sem anti-espuma.

- Água sem anti-espuma

Nos gráficos das figuras 5.24 e 5.25, representa-se, agora, a variação, com $\dot{V}_g$, dos valores dos declives e das ordenadas na origem, respectivamente, das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ (*absorção*) e de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ (*desabsorção*) versus h , obtidas em água sem anti-espuma.

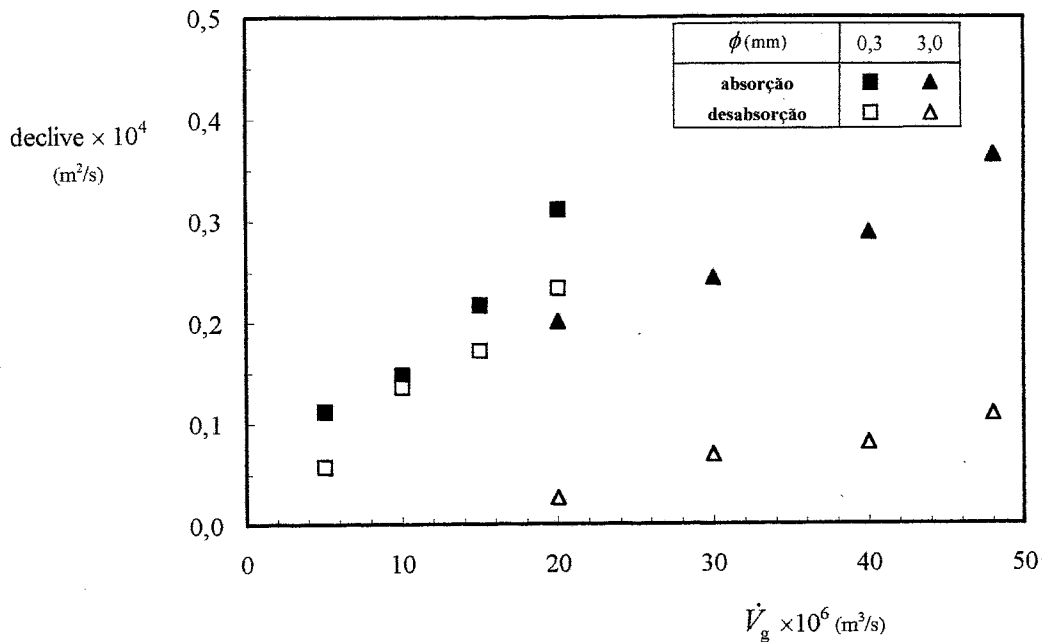


Figura 5.24 - Declive das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ e de $[(kA)_{\text{global}}^{\text{d}} - (kA)_{\text{sl}}]$ versus h , em função de $\dot{V}_g$ (água sem aditivos)

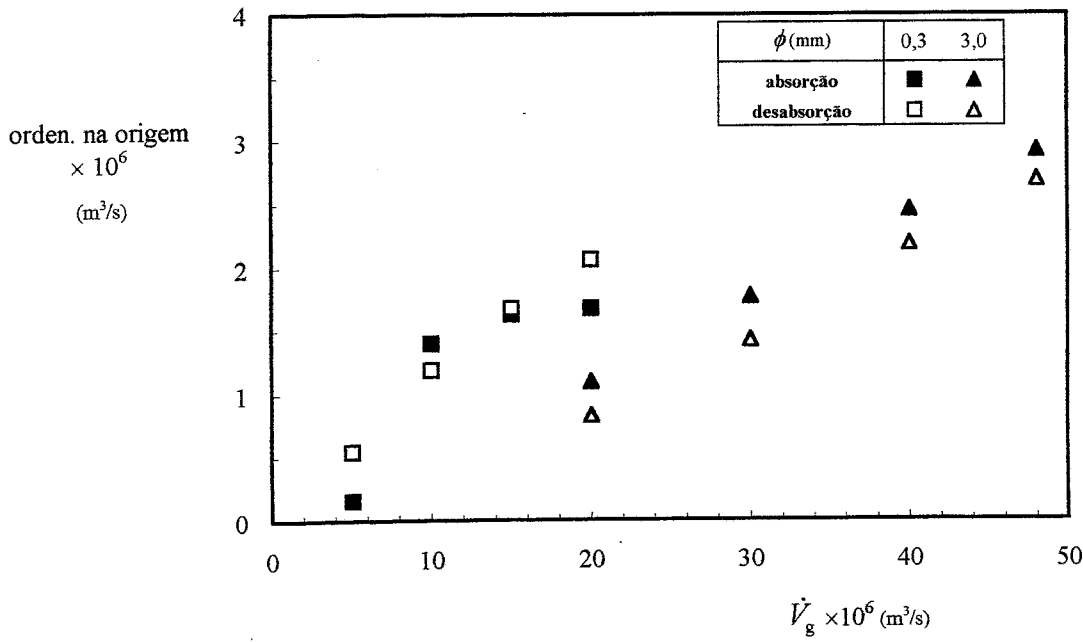


Figura 5.25 - Ordenada na origem das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ e de $[(kA)_{\text{global}}^{\text{d}} - (kA)_{\text{sl}}]$ versus h , em função de $\dot{V}_g$ (água sem aditivos)

O gráfico da figura 5.24 mostra que os valores dos declives relativos a *absorção* são superiores aos valores correspondentes a *desabsorção* quer para o orifício de 0,3 mm quer para o de 3,0 mm. Para o orifício de 3,0 mm, o afastamento é mais significativo, notando-se ainda um aumento da diferença entre os valores correspondentes a *absorção* e a *desabsorção*, com o caudal de borbulhamento, $\dot{V}_g$.

O gráfico da figura 5.25 mostra, por outro lado, que os “extremos” da coluna não parecem ser afectados de forma muito diferente pela presença das microbolhas na água, em *absorção* e em *desabsorção*.

A dissolução de microbolhas de gás, no líquido, pode ser interrompida se elas atingirem entretanto a superfície livre do líquido e se libertarem, ou se, eventualmente, forem “captadas” para o interior de uma bolha maior, durante a coalescência de duas (ou mais) bolhas “grandes”.

Quando, para um dado orifício e para o mesmo caudal de borbulhamento, a que deve corresponder uma taxa uniforme de produção de microbolhas, se aumenta a altura de líquido na coluna, está a permitir-se que microbolhas de maior tamanho consigam dissolver-se, uma vez que o trajecto até à superfície livre, pelo menos para as que provêm da zona de injeção de gás, se torna maior. Por outro lado, a presença de um maior número de bolhas na (maior) coluna de líquido, favorecerá, em determinadas condições, a formação de mais microbolhas, se ocorrerem por exemplo fenómenos de quebra de bolhas ou coalescência entre bolhas próximas.

Quando o gás borbulhante é ar e se está a dar a transferência de oxigénio do ar para a água (*absorção*), a dissolução de um maior número de microbolhas traduz-se num aumento da transferência de oxigénio, com a altura de líquido, o que resultará num maior declive das rectas de ajuste dos valores de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h . Se o gás borbulhante for azoto, pretendendo retirar-se o oxigénio dissolvido da água (*desabsorção*), o aumento da altura de líquido, na coluna, h , irá conduzir a um resultado diferente. Tal como na primeira situação, o aumento de h proporciona às microbolhas tempos de residência maiores e, portanto, maior probabilidade de dissolução total. Ora, se um maior número de microbolhas se dissolve totalmente, a contribuição que essas microbolhas poderiam ter na *desabsorção* de

oxigénio da água é anulada. Ou seja, alturas crescentes de líquido poderão resultar em contribuições das microbolhas sucessivamente menores. Isto traduzir-se-á em menores declives das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h .

Ver-se-á, de seguida, por que razão este comportamento não se verifica em água com anti-espuma (figura 5.22).

Já foi dito que a presença de anti-espuma tem, entre outros efeitos, o de promover a coalescência entre bolhas. Por outro lado, a dissolução das microbolhas é determinada pela tensão superficial e o valor da tensão superficial vai consequentemente afectar a velocidade de dissolução das microbolhas. Na presença de Fumexol (0,02% v/v), a tensão superficial da água diminui, a 25°C, de 72×10^{-3} N/m para cerca de 41×10^{-3} N/m (valor medido neste trabalho). Isto significa que, em água com Fumexol (0,02% v/v), uma microbolha de um determinado tamanho inicial se dissolve mais lentamente do que em água (ver figuras 4.20, 4.21 e 4.22). Pelo facto da dissolução ser mais lenta, há tendência para um aumento da concentração de microbolhas no líquido, o que também favorece a sua coalescência. Desta forma, o tamanho das microbolhas aumenta, o que faz retardar ainda mais o seu eventual colapso. As microbolhas resultantes, de maior tamanho, podem ser “aceleradas” na direcção da superfície livre do líquido. As que se mantêm no seio do líquido são progressivamente “contaminadas” pela adsorção de moléculas de anti-espuma que as tornam mais impermeáveis à transferência de solutos. O possível efeito do aumento da altura de líquido no aumento do tempo de residência das microbolhas, que lhes permitiria dissolverem-se totalmente passa agora a ser bem menos eficaz. Há, portanto, um maior número de microbolhas, de maior tamanho, a libertarem-se do líquido. Em *absorção*, isto significa que essas microbolhas não chegam a ceder todo o seu oxigénio à água (os declives tendem por isso a baixar ainda mais) e em *desabsorção*, essas microbolhas conseguem retirar do líquido mais oxigénio porque não chegam a dissolver-se totalmente. As contribuições das microbolhas, num e noutro processo, e, portanto, os declives tendem a aproximar-se, já que o aumento da altura de líquido não resultará num aumento sensível da taxa de dissolução de microbolhas.

Será importante, nesta altura, complementar a análise dos gráficos das figuras 5.22 a 5.25 com algumas explicações simples, baseadas no modelo físico considerado e na forma de

obtenção dos resultados. Para isso, convém considerar, de novo, uma representação típica de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função da altura de líquido na coluna de borbulhamento, h , que se esquematiza na figura 5.26, para um qualquer orifício e um dado valor do caudal de borbulhamento.

Representa-se a variação de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ com h , em água, que se verificaria na ausência de microbolhas de gás. A ordenada na origem da recta assinalada por (1), na figura 5.26, situar-se-ia algo acima do valor do coeficiente de transferência na formação, $(kA)_f$, devido à transferência de oxigénio através das bolhas retidas junto à superfície livre do líquido $((kA)_r)$. O valor do declive seria $(ka^*)_s$ e o gráfico da figura 5.26 seria, indistintamente, relativo a *absorção* ou a *desabsorção* de oxigénio.

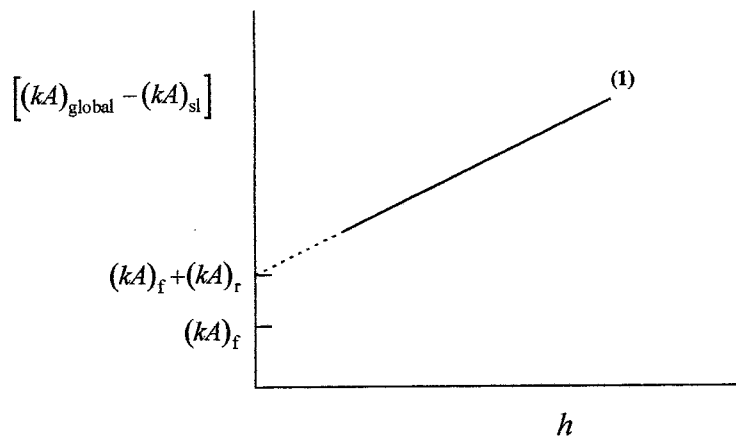


Figura 5.26 - Representação esquemática de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , na ausência de microbolhas (absorção ou desabsorção de oxigénio, em água)

A existência, na água, de microbolhas de ar que se dissolvem, total ou parcialmente, é responsável por um acréscimo da taxa de transferência de oxigénio, em absorção. Se o aumento da altura de líquido não afectasse a transferência a partir das microbolhas, o “resultado” seria traduzido pela recta a tracejado, indicada por (2), no esquema da figura 5.27.

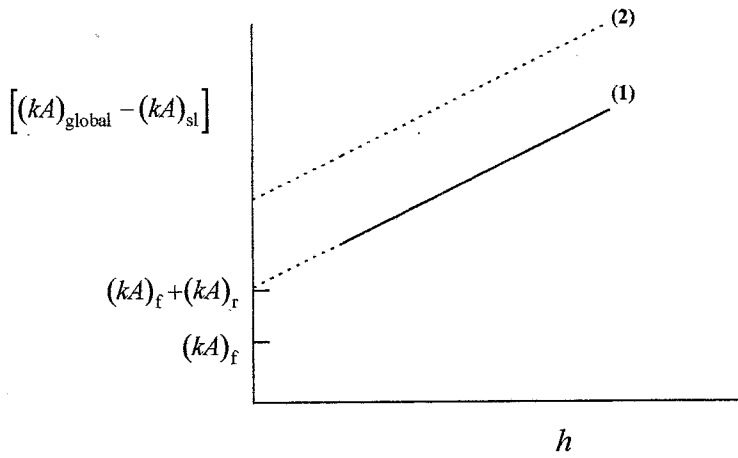


Figura 5.27 - Representação esquemática de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para absorção, em água, na ausência de microbolhas, (1), e considerando uma taxa fixa de transferência pelas microbolhas, (2)

Na realidade, o aumento de h proporciona maiores tempos de residência a microbolhas de maiores tamanhos, que podem até chegar a dissolver-se totalmente. Por isso, os valores experimentalmente determinados de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ são, para valores crescentes de h , sucessivamente mais elevados. Os símbolos marcados no gráfico da figura 5.28 representam valores experimentais hipotéticos, cuja regressão linear é representada pela recta (3).

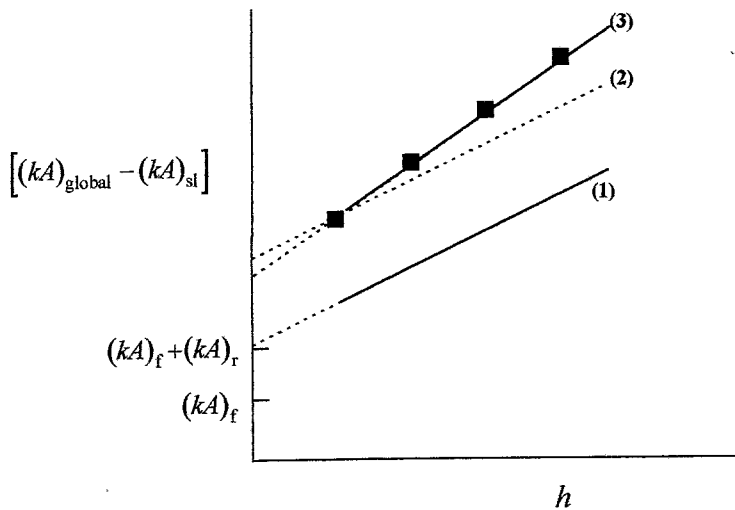


Figura 5.28 - Representação esquemática de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para absorção, em água, na ausência de microbolhas, (1), considerando uma taxa fixa de transferência pelas microbolhas, (2), e resultante do efeito de h na taxa de transferência, devido a alterações do tempo de residência das microbolhas, (3)

Como se mostra na figura 5.28, além de o declive da recta de ajuste assinalada por (3) ser superior ao da recta (2) ou (1), o ajuste dos pontos experimentais pode fazer “baixar” a ordenada na origem da recta (3), relativamente à da recta assinalada por (2).

Viu-se, até aqui, o efeito da taxa de transferência pelas microbolhas, em *absorção*. Mostra-se, em seguida, o que pode acontecer em *desabsorção*, nas mesmas condições operatórias. Começando por admitir que a variação da altura de líquido não influencia a taxa de transferência de oxigénio entre as microbolhas e a água, e portanto existe um acréscimo fixo de oxigénio retirado da água pelas microbolhas que não se dissolvem totalmente (as que se dissolvem totalmente têm um efeito nulo), a variação de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ com h poderia ser representada pela recta assinalada por (4), na figura 5.29.

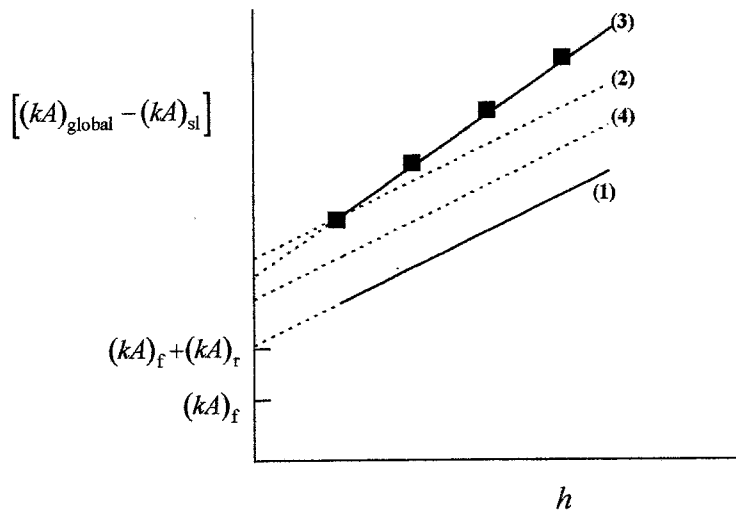


Figura 5.29 - Representação esquemática de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para absorção, em água ((1), (2) e (3)), e para desabsorção em água, (4), considerando uma taxa fixa de transferência pelas microbolhas que se dissolvem parcialmente

Percebe-se facilmente que, na figura 5.29, a recta assinalada por (4) se localize abaixo da recta (2), já que, para as mesmas condições operatórias, a “população” de microbolhas deverá ser idêntica quando se borbulha ar (*absorção* de oxigénio) ou azoto (*desabsorção* de

oxigénio). Havendo uma fracção dessas microbolhas que se dissolvem totalmente, a taxa de absorção de oxigénio aumenta, não acontecendo o mesmo com a taxa de desabsorção de oxigénio. Como se viu na secção 4.6, mesmo a dissolução parcial das microbolhas contribui, normalmente, para um maior acréscimo da taxa de absorção de oxigénio, do que da taxa de desabsorção (figuras 4.10 a 4.12 e 4.16 a 4.18).

O aumento da altura de líquido, na coluna, ao conduzir a tempos de residência mais elevados, permite que um maior número de microbolhas se dissolva totalmente e que as restantes possam perder mais oxigénio para a água. Isto traduz-se, experimentalmente, na obtenção de valores de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ inferiores aos valores “previstos” pela recta (4), afastando-se tanto mais quanto maior o valor de h . No esquema da figura 5.30, os símbolos a branco podem ser vistos como valores de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ obtidos experimentalmente, e de cujo ajuste linear resultaria a recta assinalada por (5).

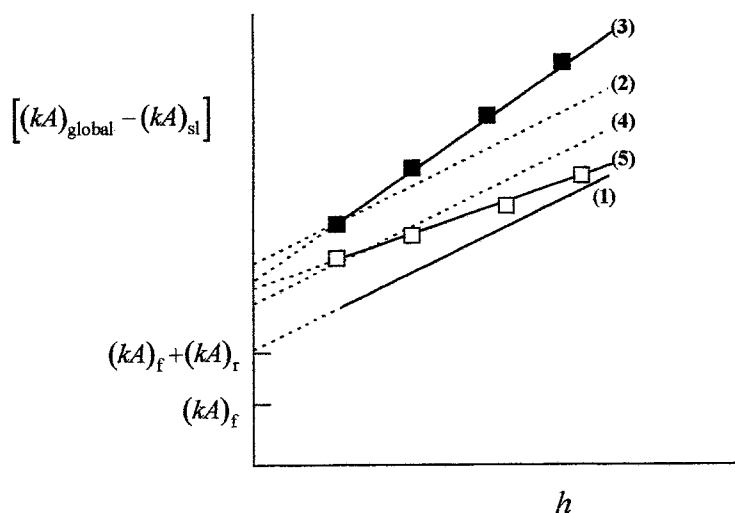


Figura 5.30 - Representação esquemática de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para absorção, em água, ((1), (2) e (3)) e para desabsorção, ((4)), considerando uma taxa fixa adicional de desabsorção de oxigénio pelas microbolhas que se dissolvem parcialmente e ((5)) considerando o efeito de h na taxa de desabsorção de oxigénio devido a alterações no tempo de residência das microbolhas

Além de evidenciar a diferença entre os declives obtidos em *absorção* (recta (3)) e em *desabsorção* (recta (5)), a figura 5.30 mostra a possibilidade de, pelo ajuste linear dos pontos experimentais de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h (recta (5)), a respectiva ordenada na origem se aproximar do valor da ordenada na origem da recta de ajuste ((3)) de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h .

Esta interpretação está de acordo com os resultados observados nos gráficos das figuras 5.24 e 5.25.

Será curioso ver, agora, o que um raciocínio idêntico permite concluir, relativamente aos resultados obtidos em água com anti-espuma. Para tal, representa-se na figura 5.31 a localização esperada, na ausência de microbolhas, em *absorção* ou *desabsorção*, dos valores de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ (recta (6)), obtidos em água *com* anti-espuma, relativamente à recta original ((1)) da figura 5.26 (água *sem* anti-espuma).

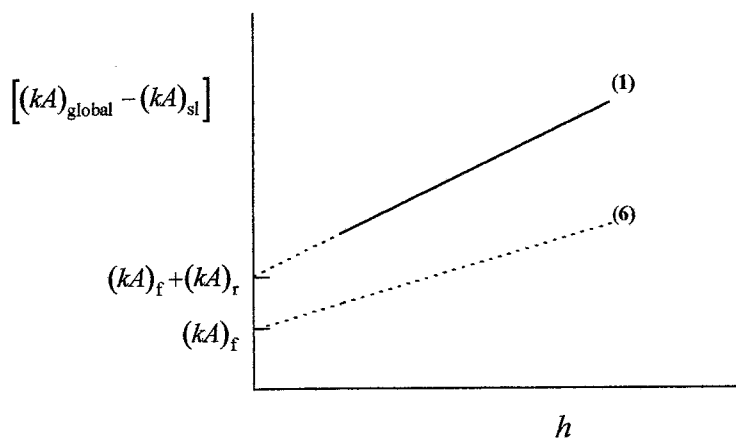


Figura 5.31 - Representação esquemática de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para absorção ou desabsorção, na ausência de microbolhas, em água, (1), e em água com anti-espuma, (6)

A ordenada na origem da recta (6) tenderia para um valor muito próximo de $(kA)_f$, uma vez eliminadas as bolhas retidas sob a superfície livre do líquido, pela acção do anti-espuma. A alteração das características de borbulhamento (coalescência, bolhas de maior tamanho), na presença de anti-espuma, bem como o possível efeito de “barreira” à transferência de massa pelas moléculas de anti-espuma, fariam prever uma diminuição da transferência de oxigénio ao longo da coluna de líquido, o que se traduziria na diminuição do declive de (6), relativamente a (1).

Vê-se, seguidamente, o resultado da presença de microbolhas no líquido.

A presença de anti-espuma na água altera o tempo de “vida” das microbolhas, relativamente ao que acontece em água sem anti-espuma, entre outros motivos, pelo efeito da variação da tensão superficial. Como se viu pelos resultados da figura 5.22, o aumento da altura de líquido na coluna não parece contribuir para uma alteração significativa da taxa de dissolução das microbolhas, uma vez que os valores dos declives representados, para *absorção* e para *desabsorção*, são bastante próximos entre si, na maioria dos casos. Nestas condições, a contribuição efectiva para o acréscimo da taxa de absorção de oxigénio resulta da dissolução total das microbolhas mais pequenas e da dissolução parcial (mecanismo provavelmente mais importante, nesta situação) das restantes microbolhas, durante a sua permanência no líquido, ou até se tornarem “impermeáveis” à transferência de solutos. A taxa, supostamente fixa, de absorção de oxigénio correspondente à dissolução das microbolhas, é traduzida, na figura 5.32, pela translacção da recta indicada por (6) para (7).

Em *desabsorção*, a taxa adicional (e igualmente fixa) de transferência de oxigénio para as microbolhas será normalmente inferior à que se encontra em *absorção*, pois até a dissolução parcial das microbolhas, mesmo para intervalos de tempo muito curtos (secção 4.6, figuras 4.20 e 4.21), favorece mais a absorção de oxigénio do que a desabsorção. Por esse motivo, a recta respeitante a *desabsorção*, que é assinalada por (8) na figura 5.32, deve encontrar-se abaixo da recta assinalada por (7) (*absorção*). A ordenada na origem correspondente à recta de ajuste de $\left[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}} \right]$ (*desabsorção*) em função de h deverá,

portanto, ser inferior ao valor da ordenada na origem de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ (absorção) em função de h .

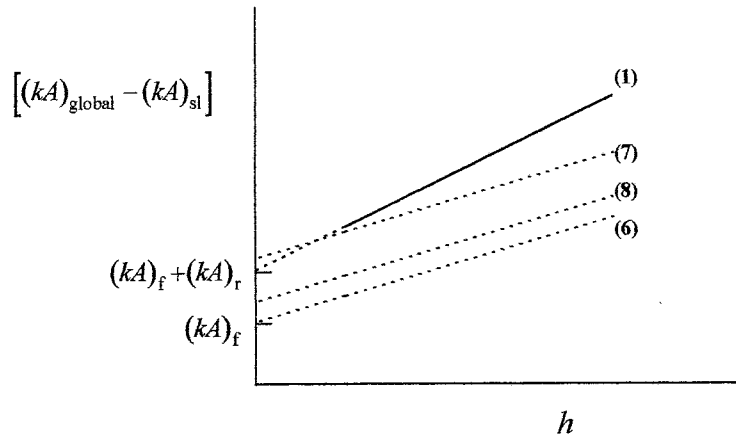


Figura 5.32 - Representação esquemática de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para absorção ou desabsorção, em água, (1), e em água com anti-espuma, (6), na ausência de microbolhas, e em água com anti-espuma considerando uma taxa fixa de transferência de oxigénio pelas microbolhas, em absorção, (7), e em desabsorção, (8)

Os resultados apresentados nos gráficos das figuras 5.22 e 5.23 sustentam esta análise, na globalidade. No entanto, a ocorrência pontual de valores superiores do declive para *desabsorção* (figura 5.22) parece sugerir que, em determinadas condições, a contribuição das microbolhas pode afectar os valores dos declives, e de forma diferente da que se observou em água *sem* anti-espuma. É possível que, com o aumento da altura de líquido, haja um incremento na “eficácia” da *desabsorção* de oxigénio para um maior número de microbolhas. Graças a um maior percurso no líquido, aumenta a probabilidade de coalescência entre microbolhas ou mesmo de “inclusão” em bolhas maiores. Desta forma, como a taxa de dissolução das “novas” microbolhas é menor, elas tornam-se “transportadores” mais eficazes de oxigénio para fora do líquido, fazendo aumentar o declive de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h . Acontecendo o mesmo em *absorção*, as “novas” microbolhas transferem igualmente

menos oxigénio para a água, devido ao seu maior tamanho, o que se vai traduzir em menores declives de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h .

Voltando ao esquema da figura 5.32, a possibilidade atrás analisada traduzir-se-ia num aumento do declive da recta de ajuste de $[(kA)_{\text{global}}^{\text{d}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , relativamente a (8) e de uma diminuição do declive da recta de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , relativamente a (7). As rectas assinaladas por (9) (*absorção*) e por (10) (*desabsorção*), no esquema da figura 5.33, permitem visualizar essa hipótese. Como se pode ver, essa alteração traduz-se num maior afastamento entre as ordenadas na origem das rectas (9) e (10) e, por outro lado, numa maior aproximação entre a ordenada na origem da recta (10) (*desabsorção*), e o valor teórico de $(kA)_f$, o que que está de acordo com o que se observa na figura 5.23.

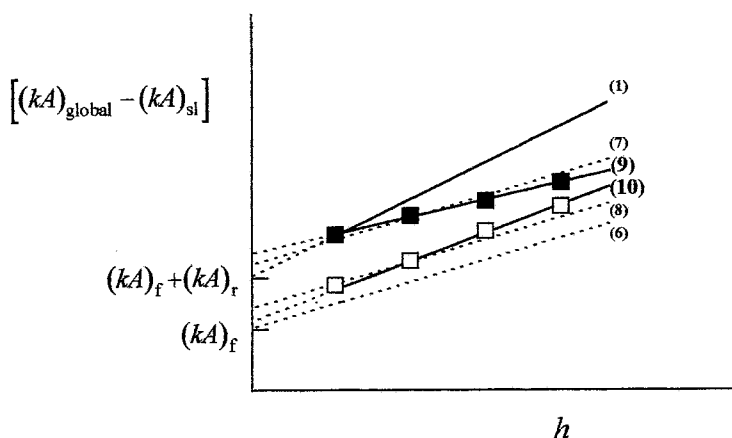


Figura 5.33 - Representação esquemática de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para absorção ou desabsorção, em água, (1), e em água com anti-espuma, (6), na ausência de microbolhas; em água com anti-espuma considerando uma taxa fixa de transferência de oxigénio pelas microbolhas, em absorção, (7), e em desabsorção, (8), ou considerando o efeito de h em absorção, (9), e em desabsorção, (10)

Com a análise anterior pretendeu-se, de uma forma simples, fazer uma interpretação lógica e fisicamente aceitável dos resultados obtidos.

De acordo com essa mesma análise e com os resultados disponíveis, parece utópico e pretensioso querer separar as diferentes contribuições, relativas às bolhas *retidas* sob a superfície livre do líquido, às bolhas em *subida* na coluna de líquido, ou mesmo à *formação* das bolhas, determinando valores de coeficientes de transferência de massa individuais, para as diferentes condições experimentais adoptadas.

A contribuição das microbolhas na transferência de oxigénio é, sem dúvida, importante, representando uma parcela significativa da taxa global de transferência. Os resultados mostram que, como seria previsível, o aumento do caudal de borbulhamento faz aumentar a parcela de transferência atribuível às microbolhas.

O desconhecimento das características da “população” de microbolhas, para as diferentes condições, não permite a quantificação exacta daquela parcela (e consequentemente das outras). No Capítulo 4, secção 4.2.2, apresentou-se um procedimento simples que, partindo do pressuposto que as microbolhas se dissolveriam completamente, permitia determinar o volume de gás que seria necessário estar disperso sob a forma de microbolhas para justificar o afastamento entre valores experimentais e teóricos de $(kA)_f$.

Para completar esta análise, e porque nem todas as microbolhas se dissolverão na totalidade, sugere-se, na secção seguinte, uma outra abordagem do problema, com base nos resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido no Capítulo 4 (secção 4.6). Essa abordagem permitirá, não tanto obter resultados exactos (o que seria impossível), mas sim confirmar a relevância da contribuição das microbolhas para a taxa global de transferência de massa, mostrando que as diferenças observadas experimentalmente em *absorção* e em *desabsorção* são aceitáveis.

5.4 QUANTIFICAÇÃO DA TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE OXIGÉNIO ATRAVÉS DAS MICROBOLHAS

Admita-se, por hipótese, que, para um dado orifício e caudal de borbulhamento se formam em estado estacionário, microbolhas a uma frequência de N microbolhas por segundo, com um determinado diâmetro inicial, d_0 . Acima de um dado valor de d_0 é provável que o tempo de residência, t_r , das microbolhas, na coluna de borbulhamento, seja inferior ao tempo necessário para o seu colapso (t_c). Se, ao fim do tempo $t = t_r$, uma microbolha de diâmetro inicial d_0 que sai do líquido, “perdeu” (*absorção*) ou reteve (*desabsorção*) x mg de oxigénio, a partir desse instante, a taxa de transferência de oxigénio relativa às microbolhas presentes na coluna atinge um valor estacionário e igual a (Nx) mg/s.

É fácil compreender este raciocínio, visualizando a situação mais simples, que corresponde a formar-se uma microbolha em cada segundo. A distribuição de tamanhos correspondente, ao longo do tempo, é esquematizada na figura 5.34. Considera-se ainda que, por hipótese, o tempo de residência de cada microbolha no líquido é de 4 segundos.

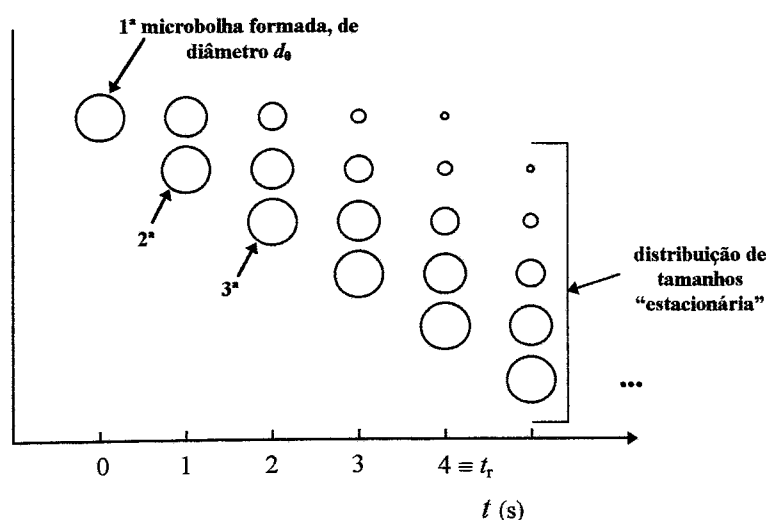


Figura 5.34 - Esquema ilustrativo da distribuição de tamanhos das microbolhas no líquido, ao longo do tempo, para um tempo de residência de 4 segundos, à frequência de formação de uma microbolha por segundo

Na situação considerada na figura 5.34, a partir dos 4 segundos a distribuição de tamanhos de microbolhas presentes na coluna manter-se-ia “estacionária”. A taxa de transferência de oxigénio através das várias microbolhas presentes no líquido seria, daí em diante, equivalente à quantidade de oxigénio transferida pela primeira microbolha formada, desde o início até $t = t_r = 4$ s.

A diferentes tempos de residência e diferentes tamanhos iniciais corresponderão taxas distintas de absorção de oxigénio e de desabsorção de oxigénio.

Os resultados da simulação da evolução de microbolhas, apresentados na secção 4.6, nos gráficos das figuras 4.10 a 4.12 (f_{O_2}) e 4.16 a 4.18 (f'_{O_2}), para algumas das condições dos ensaios de transferência de massa, permitem conhecer a quantidade de oxigénio transferida por uma microbolha com um dado tamanho inicial, desde a sua formação até um determinado instante de tempo.

Considere-se, por exemplo, o que se passa para o orifício de 0,3 mm, considerando o caudal de borbulhamento de 20×10^{-6} m³/s e altura de água na coluna de 120 mm. Nestas condições, no ensaio de absorção (tipo A) a concentração de oxigénio dissolvido, C , na coluna de borbulhamento era de $5,5 \times 10^{-3}$ kg/m³, para um valor de C^* de $8,25 \times 10^{-3}$ kg/m³. Pelas tabelas 5.1 e 5.3, verifica-se que a diferença entre os valores correspondentes do declive de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ (absorção) e de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ (desabsorção) em função de h , é de $0,074 \times 10^{-4}$ m²/s.

A taxa adicional de transferência de oxigénio, em absorção, será então equivalente a

$$(0,074 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}) \times h \times (C^* - C) = 2,31 \times 10^{-9} \text{ kg/s} \quad (5.1)$$

Admita-se que se formam N microbolhas de ar por segundo, de diâmetro inicial igual a 100 μm (a que corresponde uma massa inicial de oxigénio, em cada microbolha, de $1,46 \times 10^{-13}$ kg), e que o tempo de residência médio das microbolhas na água é de 10 segundos. Os resultados da simulação da evolução de microbolhas apresentados na secção 4.6 indicam que, ao fim desse tempo, a fracção do oxigénio inicial da bolha transferido para a água, f_{O_2} , é de 0,24, o que corresponde a uma massa de oxigénio de $3,5 \times 10^{-14}$ kg. A taxa de absorção de

oxigénio relativa às microbolhas presentes no líquido, será então de $(3,5 \times 10^{-14} \text{ N}) \text{ kg/s}$, a partir dos 10 segundos.

Nas mesmas condições, os resultados da simulação de bolhas, inicialmente de azoto em *desabsorção*, indicam que, para $t = 10 \text{ s}$, $f'_{\text{O}_2} = 0,19$, e, portanto, a taxa de desabsorção de oxigénio, da água para as microbolhas existentes no líquido, seria, a partir de então, igual a $(2,8 \times 10^{-14} \text{ N}) \text{ kg/s}$.

Para que a diferença $[3,5 \times 10^{-14} \text{ N} - 2,8 \times 10^{-14} \text{ N}]$ seja equivalente à taxa adicional de absorção de oxigénio calculada anteriormente $(2,31 \times 10^{-9} \text{ kg/s})$, obtém-se $N = 3,16 \times 10^5$ microbolhas/s. Em termos do volume de gás, $\dot{V}_{\text{mb}}$, que, em cada segundo, teria que ser disperso nas N microbolhas de diâmetro inicial igual a $100 \text{ }\mu\text{m}$, obter-se-ia $\dot{V}_{\text{mb}} = 0,17 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, o que equivale a 0,8% do caudal de borbulhamento $(20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s})$.

Se se considerar um tempo de residência superior, por exemplo, de 100 segundos, a que correspondem valores de f_{O_2} e de f'_{O_2} mais afastados entre si, o caudal de gás disperso em microbolhas de $100 \text{ }\mu\text{m}$, teria que ser apenas de $5,5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$.

Na tabela 5.5, apresentam-se os valores de $\dot{V}_{\text{mb}}$ determinados para diferentes condições operatórias (diâmetro do orifício e caudal de borbulhamento), considerando diferentes tamanhos iniciais de microbolhas e vários valores (possíveis) de tempos de residência médios.

Os valores de $\dot{V}_{\text{mb}}$, apresentados na tabela 5.5, mostram que são as microbolhas de menor tamanho as que mais facilmente se podem “responsabilizar” pelas diferenças verificadas entre as taxas de transferência de oxigénio em absorção e em desabsorção. De entre os resultados tabelados, os valores de $\dot{V}_{\text{mb}}$ fisicamente mais aceitáveis encontram-se para $d_0 = 60 \text{ }\mu\text{m}$ e $t_r \geq 100 \text{ s}$, ou para $d_0 = 20 \text{ }\mu\text{m}$.

Tabela 5.5 - Valores do caudal de gás, $\dot{V}_{mb}$, necessários para justificar as diferenças verificadas entre as taxas de absorção e de desabsorção de oxigénio, em água (figura 5.24), considerando diferentes tamanhos iniciais das microbolhas (d_0) e diferentes tempos de residência (t_r)

ϕ (mm)	$\dot{V}_g \times 10^6$ (m ³ /s)	d_0 (μ m)	t_r (s)	$\dot{V}_{mb} \times 10^6$ (m ³ /s)	Observações
0,3	5,0	100	10	-	$f'_{O_2} > f_{O_2}$
			100	0,223	
			200	0,052	
		60	10	-	$f'_{O_2} > f_{O_2}$
			100	0,018	
			200	0,009	$t_r \approx t_c$
		20	8	0,008	$t_r \approx t_c$
		100	10	0,175	
			100	0,058	
			200	0,034	
			60	0,096	
			100	0,016	
			200	0,009	$t_r \approx t_c$
		20	8	0,008	$t_r \approx t_c$
3,0	20	100	10	-	$f'_{O_2} > f_{O_2}$
			100	0,528	
			200	0,127	
		60	10	-	$f'_{O_2} > f_{O_2}$
			100	0,043	
			200	0,021	$t_r \approx t_c$
		20	8	0,019	$t_r \approx t_c$
		100	10	-	$f'_{O_2} > f_{O_2}$
			100	0,306	
			200	0,150	
			60	0,780	
			100	0,049	
			200	0,025	$t_r \approx t_c$
		20	8	0,023	$t_r \approx t_c$

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO

Numa primeira fase, um estudo experimental baseado em metodologia já conhecida, mostra a insuficiência de um modelo de quatro zonas para descrever o processo global de transferência de massa, numa coluna de borbulhamento.

Esse modelo considera a existência de quatro zonas distintas numa coluna de borbulhamento (*formação* das bolhas, *subida* das bolhas ao longo do líquido, bolhas *retidas* sob a superfície livre do líquido e *superfície livre* do líquido), mas os valores obtidos experimentalmente para o coeficiente de transferência de massa associado à *formação* das bolhas são muito superiores aos previstos teoricamente (até 8 vezes, tomando a correlação que dá estimativas mais optimistas).

Postula-se então, como ponto de partida para uma investigação mais aprofundada, que o “excesso” de transferência observado é devido à dissolução completa, ou quase, de microbolhas ($d \leq 100 \mu\text{m}$) de ar que vão sendo dispersas no líquido, sendo contudo invisíveis à vista desarmada.

Conforme se demonstra no Capítulo 4, uma fracção muito pequena ($\leq 0,0022$) do caudal de ar, dispersa no líquido sob a forma de microbolhas, que se dissolvam na totalidade, é suficiente para justificar os desvios observados entre os valores experimentais e teóricos das taxas de transferência de oxigénio associadas à formação das bolhas.

Verificou-se então, experimentalmente, que há formação de microbolhas e que esta é favorecida pelo borbulhamento intenso de gás. As microbolhas são formadas por vários processos, nomeadamente o rebentamento de bolhas maiores, à superfície do líquido, a fragmentação do “jacto” de ar na zona de injeção, junto ao orifício, e ainda a quebra e/ou

coalescência de bolhas próximas, no seio do líquido, de que resultam por vezes microbolhas “satélites”.

Devido ao seu reduzido tamanho, as microbolhas podem permanecer no líquido por períodos de tempo elevados. Além disso, a pressão total no interior das microbolhas ($P = P_e + 4\sigma/d$) é superior à pressão no líquido envolvente, sendo a diferença devida ao termo da tensão superficial ($4\sigma/d$), tanto mais significativo quanto menor o diâmetro da bolha, d . A importância da parcela $4\sigma/d$ é tal que pode haver dissolução de gás, em condições de aparente equilíbrio com o líquido.

Não sendo possível fazer um estudo experimental directo do processo de dissolução das microbolhas, recorreu-se a um conjunto de experiências que pudessem servir de teste à ideia postulada.

A determinação experimental (alternada) de coeficientes globais de transferência de oxigénio, do ar para a água (*absorção*) e da água para uma corrente de azoto (*desabsorção*), a borbuharem a caudais iguais, pelos mesmos orifícios, conduziu a resultados importantes.

Nos ensaios com borbulhamento intenso do gás, os valores dos coeficientes globais de transferência de oxigénio para *absorção* são significativamente superiores (até duas vezes) aos correspondentes a *desabsorção*. Já para borbulhamentos com baixos caudais de gás, que não promovem a formação de um número apreciável de microbolhas, os valores dos coeficientes de transferência obtidos para as duas situações (*absorção* e *desabsorção*) são muito próximos.

Estes resultados confirmam a relevância da contribuição da dissolução das microbolhas para a transferência de oxigénio entre gás e líquido, já que só para *absorção* a dissolução completa das microbolhas joga a favor de uma transferência acrescida.

Nos Capítulos 3 e 4, é apresentado um estudo detalhado sobre a evolução de microbolhas de gás imersas em líquido, que mostra que o tempo de dissolução total, t_c , das microbolhas aumenta acentuadamente com o seu diâmetro inicial, d_0 . Para o sistema ar-água, em particular, observou-se uma dependência do tipo $t_c = Ad_0^3$. As microbolhas de maior tamanho são, também, as que mais facilmente se libertam pela superfície livre do líquido. Concluiu-se, então, que se uma dada fracção do caudal de ar estiver dispersa sob a forma de

microbolhas, a respectiva contribuição para a taxa global de transferência de oxigénio é tanto maior quanto menores os tamanhos das microbolhas formadas. Esta conclusão é confirmada pelos resultados apresentados na secção 5.4.

Os resultados obtidos neste trabalho evidenciam claramente a importância das microbolhas mas não permitem afirmar que elas são o “único responsável” pelos acréscimos dos valores experimentais relativamente às previsões teóricas habituais em transferência de massa.

Pensa-se que, em determinadas condições ($We \gg 4$), a formação turbulenta das bolhas, no orifício, pode também ser responsável pelo aumento pronunciado da taxa de transferência de massa associado a essa zona.

Os resultados do estudo de transferência de massa realizado confirmam que a injeção de um dado caudal de gás, através de orifícios de diferentes diâmetros, resulta sistematicamente na obtenção de taxas de transferência de massa superiores para os orifícios de menor diâmetro. Não só se verificam aumentos de transferência na *formação*, mas também nas taxas de transferência por altura de líquido na coluna, o que se explica pela criação de maiores áreas interfaciais, quando o borbulhamento do gás é feito através de orifícios mais pequenos. É ainda razoável admitir que a injeção de gás através de orifícios mais pequenos promova a formação de um maior número de microbolhas, para o mesmo caudal de borbulhamento.

Os valores experimentais dos coeficientes globais de transferência de oxigénio, para cada um dos orifícios, dependem acentuadamente do caudal de borbulhamento e da altura de líquido na coluna, o que confirma as expectativas e está de acordo com resultados de trabalhos anteriores.

Foram determinados, para todas as condições testadas, os valores dos coeficientes de transferência de oxigénio através da superfície livre do líquido. Os resultados obtidos indicam que, nas condições do presente trabalho, o coeficiente de transferência de massa através da

superfície livre do líquido aumenta, sensivelmente, com o caudal de borbulhamento, não se registando uma variação significativa com a altura de líquido na coluna.

Apesar dos esforços desenvolvidos, o desconhecimento do valor “exacto” da taxa de transferência de massa associada às microbolhas impede a determinação isolada e com rigor dos coeficientes individuais de transferência de massa relativos à *formação*, *subida* das bolhas e bolhas *retidas* junto à superfície livre.

Verifica-se, contudo, que os valores experimentais correspondentes à taxa de transferência por unidade de altura de líquido na coluna são comparáveis aos valores previstos (pelas correlações consideradas) do coeficiente de transferência de massa relativo à *subida* das bolhas, $(ka^*)_s$, para caudais de borbulhamento inferiores ou iguais a $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, utilizados com os orifícios de 0,2 e 0,3 mm.

A quantificação da taxa de transferência associada às microbolhas exige o conhecimento da distribuição de tamanhos e dos tempos de residência das bolhas no líquido. Esse estudo, que se considera da maior importância e que aqui é sugerido como trabalho futuro, beneficiará, sem dúvida, de técnicas específicas de análise de imagem, que têm vindo a ser desenvolvidas e se tornarão cada vez mais acessíveis.

Os resultados apresentados nesta tese sugerem ainda que se investigue a influência do diâmetro do orifício na frequência de formação de microbolhas. Espera-se que, para caudais de borbulhamento superiores aos utilizados neste trabalho, com os orifícios de 0,2 e 0,3 mm, a frequência de formação de microbolhas, em particular junto ao orifício, seja maior, para orifícios de menor diâmetro. Prevê-se que a injeção de gás, nestas condições, dê lugar a taxas de transferência de massa muito elevadas, e substancialmente superiores às observadas com o orifício de 3,0 mm. Um complemento importante do estudo sugerido será a obtenção de imagens, por filmagem a alta velocidade, da formação de bolhas nos diferentes orifícios.

A.1 COMPARAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS DO LADO DO LÍQUIDO E DO LADO DO GÁS, NA TRANSFERÊNCIA DE GASES POUCO SOLÚVEIS NO LÍQUIDO

A análise aqui apresentada pretende demonstrar que, no sistema estudado, de transferência de oxigénio (e azoto) entre ar e água, a resistência à transferência de massa do lado do gás é desprezável, comparativamente à resistência do lado do líquido.

Considere-se a transferência de soluto entre a fase gasosa e a fase líquida. A figura A.1.1 representa os perfis de concentração correspondentes à transferência de soluto do gás para o líquido. Para o que se pretende demonstrar, é irrelevante o sentido do fluxo de massa.

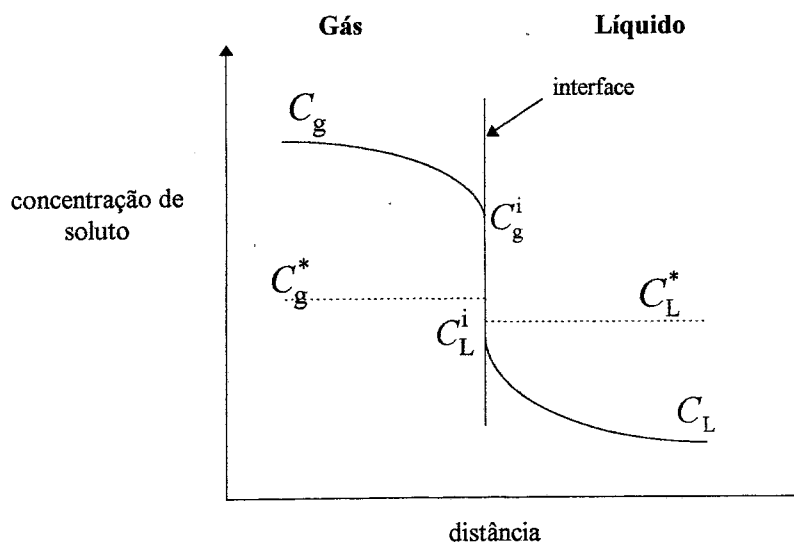


Figura A.1.1 - Perfis de concentração relativos à transferência de soluto entre gás e líquido.

O fluxo molar pode ser expresso por

$$\dot{n} = k_G A (C_g - C_g^i) \quad (\text{A.1.1})$$

em que C_g e C_g^i representam a concentração molar de soluto no seio do gás e na interface, respectivamente. O mesmo fluxo pode também ser definido em termos de um coeficiente individual do lado do líquido, k_L ,

$$\dot{n} = k_L A (C_L^i - C_L) \quad (\text{A.1.2})$$

sendo C_L^i a concentração molar de soluto na interface, do lado do líquido, e C_L a concentração molar de soluto no seio do líquido (longe da interface).

Pode ainda definir-se o fluxo molar de transferência de soluto com base num coeficiente global de transferência, por exemplo do lado do líquido,

$$\dot{n} = K_L A (C_L^* - C_L) \quad (\text{A.1.3})$$

em que C_L^* é a concentração de soluto que, na fase líquida, estaria em equilíbrio com a concentração de soluto na fase gasosa, C_g . No caso de o soluto gasoso ser pouco solúvel no líquido, é aplicável a lei de Henry, pelo que as duas concentrações, C_L^* e C_g , se podem relacionar pela constante de proporcionalidade respectiva, H

$$C_L^* = H C_g \quad (\text{A.1.4})$$

e como

$$C_L^i = H C_g^i \quad (\text{A.1.5})$$

utilizando as relações de equilíbrio, dadas pelas equações (A.1.4) e (A.1.5), em conjunto com as equações (A.1.1) e (A.1.2), obtém-se

$$\frac{1}{K_L A} = \frac{1}{k_L A} + \frac{H}{k_G A} \quad (\text{A.1.6})$$

O primeiro termo desta equação representa a “resistência” total à transferência de massa; a resistência do lado do líquido é dada pela primeira parcela do segundo membro da equação, e a segunda parcela representa a resistência do lado do gás.

Conhecidos os coeficientes individuais ou, apenas, a razão entre eles, é possível avaliar a importância relativa de cada uma das resistências. É o que se fará seguidamente, para o caso particular da transferência de oxigénio (e azoto) entre ar e água.

De acordo com a teoria da penetração de Higbie, ou com as teorias de renovação da superfície, os coeficientes de transferência de massa são proporcionais à raiz quadrada das respectivas difusividades (Sherwood *et al.*, 1975, Treybal, 1980). Como a razão entre a difusividade do oxigénio (ou do azoto) no ar e a difusividade do oxigénio (ou do azoto) na água é da ordem de 10^4 , o valor de k_G será cerca de 100 vezes superior ao valor de k_L . A constante de proporcionalidade da lei de Henry (eq. A.1.4), para o oxigénio, é igual a $3,1 \times 10^{-2}$, a 25°C (Perry e Chilton, 1973). Portanto, a resistência do lado do líquido será da ordem de 10^3 vezes superior à do lado do gás. Para o azoto, como $H = 1,6 \times 10^{-2}$, a razão entre a resistência do lado do líquido e a resistência do lado do gás é ainda mais elevada do que para o oxigénio.

Conclui-se, assim, ser válido desprezar a resistência do lado do gás, relativamente à resistência do lado do líquido, no sistema estudado.

A.2 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA PRESSÃO PARCIAL DE OXIGÉNIO NUMA BOLHA DE AR, OU DE AZOTO, AO ATRAVESSAR UMA COLUNA DE ÁGUA

Pretende mostrar-se que, nas condições do presente trabalho, a variação da pressão parcial de oxigénio numa bolha de ar (ou de azoto) de diâmetro não muito reduzido, ao longo de uma coluna de água, pouco profunda, não é significativa.

A pressão parcial de um soluto numa bolha (com vários componentes) varia se a respectiva fracção molar e/ou a pressão total no interior da bolha variarem.

Como as bolhas em causa têm dimensões para as quais o termo da tensão superficial ($4\sigma/d$) não é importante, a pressão total no seu interior é praticamente igual à pressão externa à bolha. No caso presente, a variação da pressão externa reduz-se à variação da pressão hidrostática e é desprezável, relativamente à pressão de operação (atmosférica).

A transferência de soluto(s) entre a bolha e o líquido pode fazer variar mais ou menos significativamente as fracções molares dos vários constituintes da bolha e, conseqüentemente, as respectivas pressões parciais. Quando as quantidades de solutos transferidos entre a bolha e o líquido são muito pequenas, como acontece para gases pouco solúveis no líquido, se o tempo de contacto entre a bolha e o líquido for curto, a variação das pressões parciais na bolha não será significativa.

Demonstra-se seguidamente que, nas condições do presente trabalho, a pressão parcial de oxigénio, numa bolha de ar ou de azoto, praticamente não varia, ao longo de uma coluna pouco profunda de água.

Considere-se que está a borbulhar ar, a um caudal constante, $\dot{V}_g$, através de um orifício na base de uma coluna de água, de altura h . Admite-se que o volume de cada bolha, V_b , não se altera significativamente, ao longo da coluna.

Se a concentração de oxigénio dissolvido na água for inferior ao valor da concentração em equilíbrio com a respectiva pressão parcial na bolha, há transferência de oxigénio do gás para o líquido (absorção). A variação, com o tempo, do número de moles de oxigénio na bolha, n , a temperatura constante, T , e considerando o gás perfeito, é dada por

$$\frac{dn}{dt} = \frac{V_b}{RT} \frac{dp}{dt} \quad (\text{A.2.1})$$

representando p a pressão parcial de oxigénio na bolha e R a constante da equação de estado dos gases perfeitos (8,314 J/(mol K)).

Essa variação (negativa, no caso presente) é igual ao número de moles de oxigénio transferido para a água, por unidade de tempo,

$$-\frac{V_b}{RT} \frac{dp}{dt} = kA_b(C^* - C_0) \quad (\text{A.2.2})$$

em que k representa o coeficiente de transferência de massa, do lado do líquido, A_b a área superficial da bolha, C^* a concentração de oxigénio que, na água, estaria em equilíbrio com a respectiva pressão parcial na bolha, p , e C_0 a concentração média de oxigénio dissolvido na água.

Como a lei de Henry é aplicável a este sistema, pode exprimir-se C^* como

$$C^* = Hp \quad (2.2)$$

Por outro lado, durante o tempo de subida de uma bolha, a concentração de oxigénio na água, C_0 , praticamente não varia, pelo que se poderá escrever

$$-\frac{V_b}{H} \frac{d(C^* - C_0)}{(C^* - C_0)} = RTkA_b dt \quad (\text{A.2.3})$$

Designando por t_c o tempo total de contacto entre a bolha e o líquido, desde a injeção, na base da coluna, até ao rebentamento, à superfície do líquido, a integração da equação (A.2.3), entre $t = 0$ e $t = t_c$, resultará em

$$\frac{(C^* - C_0)_{\text{topo}}}{(C^* - C_0)_{\text{base}}} = \exp\left(-\frac{H\mathcal{R}T k A_b}{V_b} t_c\right) \quad (\text{A.2.4})$$

Se N_b representar o número total de bolhas presentes na coluna, com área superficial média A_b e volume médio V_b , o produto $N_b A_b$ representa a área total de transferência relativa às bolhas presentes na coluna e o produto $N_b V_b$, o volume total de gás na coluna, que pode igualmente ser expresso como $\dot{V}_g t_c$.

A equação A.2.4, que é equivalente a

$$\frac{(C^* - C_0)_{\text{topo}}}{(C^* - C_0)_{\text{base}}} = \exp\left(-\frac{H\mathcal{R}T k N_b A_b}{N_b V_b} t_c\right) \quad (\text{A.2.4})$$

fica, então,

$$\frac{(C^* - C_0)_{\text{topo}}}{(C^* - C_0)_{\text{base}}} = \exp\left(-\frac{H\mathcal{R}T (kA)}{\dot{V}_g}\right) \quad (\text{A.2.5})$$

em que (kA) é o coeficiente global de transferência de massa (incluída a área), na coluna de borbulhamento (excluída a transferência através da superfície livre do líquido).

Se for conhecido o coeficiente de transferência de massa, (kA) , para o caudal de borbulhamento $\dot{V}_g$, pode determinar-se a razão $(C^* - C_0)_{\text{topo}} / (C^* - C_0)_{\text{base}}$, o que permite analisar a variação de C^* (ou p) ao longo da coluna.

Pretende-se mostrar que, nas condições do presente trabalho, aquela razão é muito próxima da unidade ($\therefore C_{\text{topo}}^* \cong C_{\text{base}}^*$). Como a variação máxima de C^* ocorrerá, obviamente,

para as alturas de líquido mais elevadas, vai fazer-se esta análise com base nos valores de (kA) determinados experimentalmente para a altura máxima utilizada nos ensaios, $h = 180$ mm. Vão considerar-se valores de (kA) obtidos para os diferentes orifícios ($\phi = 0,2, 0,3$ e $3,0$ mm) e para diferentes caudais de borbulhamento. A temperatura adoptada foi 25°C , sendo $H = 1,25 \times 10^{-5}$ mol/(Nm), para o oxigénio, a essa temperatura (Perry e Chilton, 1973). Os resultados obtidos pela equação (A.2.5) são apresentados na tabela A.2.1.

Se o gás de borbulhamento for azoto puro, pode fazer-se uma dedução idêntica à anterior. Nestas condições, ocorre desabsorção de oxigénio da água para as bolhas. À entrada da coluna, C^* vale zero, já que a pressão parcial de oxigénio no gás é nula. Representando $(kA)^d$ o coeficiente de transferência de massa correspondente a esta situação (desabsorção), a equação final, idêntica à equação (A.2.5), é

$$\frac{(C^* - C_0)_{\text{topo}}}{(0 - C_0)_{\text{base}}} = -\exp\left(\frac{HRT(kA)^d}{\dot{V}_g}\right) \quad (\text{A.2.5.a})$$

Na tabela (A.2.1), são também apresentados os valores de $\left[(C^* - C_0)_{\text{topo}} / (0 - C_0)_{\text{base}}\right]$, obtidos por resolução da equação (A.2.5.a), utilizando os valores experimentais dos coeficientes de transferência relativos a desabsorção de oxigénio $[(kA)^d]$ (determinados a partir de ensaios tipo C, descritos no Capítulo 4), para as mesmas condições experimentais.

Por análise dos valores tabelados, conclui-se que a variação máxima de $(C^* - C_0)$ entre a base e o topo da coluna é de apenas 1,7%.

É assim válido afirmar que a pressão parcial de oxigénio no gás é praticamente constante, desde a entrada até à saída da coluna de água, nas condições do presente trabalho.

Tabela A.2.1 - Resultados obtidos por resolução das equações (A.2.5) e (A.2.5.a), para os diferentes orifícios e diferentes caudais de gás ($h = 180 \text{ mm}$)

ϕ (mm)	$\dot{V}_g \times 10^6$ (m ³ /s)	$kA \times 10^6$ (m ³ /s)	$\frac{(C^* - C_0)_{\text{topo}}}{(C^* - C_0)_{\text{base}}}$	$(kA)^d \times 10^6$ (m ³ /s)	$\frac{(C^* - C_0)_{\text{topo}}}{(0 - C_0)_{\text{base}}}$
0,2	2,3	1,11	0,985	0,955	0,987
	8,0	4,34	0,983	3,57	0,986
0,3	5,0	2,30	0,986	1,52	0,991
	20	7,49	0,988	6,45	0,990
3,0	20	4,60	0,993	1,32	0,998
	48	9,47	0,994	4,63	0,997

A.3 DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DE UMA BOLHA DE GÁS FORMADA NUM ORIFÍCIO, A CAUDAL CONSTANTE

A análise que aqui vai ser feita baseia-se no estudo de Råbiger e Vogelphol (1983), que desenvolveram um modelo para determinar o diâmetro de bolhas, formadas em orifícios, a caudal constante, para a gama completa de caudais de gás, em líquido parado ou em movimento.

Quando uma bolha se está a formar num orifício, na base de uma coluna de líquido, está sujeita a várias forças. Algumas destas forças têm o efeito de reter a bolha no orifício (inércia, arrasto, tensão superficial), enquanto que a força de impulsão e a quantidade de movimento imposta ao gás, ao atravessar o orifício, promovem o desprendimento da bolha. Enquanto as três primeiras forças são predominantes, a bolha aumenta de tamanho, pela entrada contínua de gás. Quando a impulsão e a quantidade de movimento se sobrepõem às outras forças, a bolha desprende-se do orifício. Råbiger e Vogelphol apenas consideram as forças de impulsão, arrasto e tensão superficial, no balanço de forças aplicado à bolha em formação. Neste trabalho, consideram-se ainda a força de inércia e a quantidade de movimento, que, para orifícios muito pequenos (tais como os utilizados, de 0,2 e 0,3 mm), deixa normalmente de ser desprezável.

Considere-se o esquema da figura A.3.1, em que se representa uma bolha em formação num orifício de diâmetro ϕ .

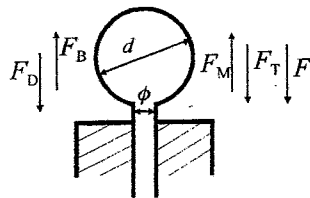


Figura A.3.1 - Bolha de gás em formação num orifício submerso numa coluna de líquido. Forças aplicadas sobre a bolha

Considerando que a bolha se forma esfericamente, e a caudal constante, $\dot{V}_g$, ao fim do tempo t o volume da bolha será $\dot{V}_g t = \pi d^3/6$. Definem-se seguidamente as várias forças aplicadas à bolha.

i) Força de impulsão, F_B

$$F_B = \Delta \rho g \left(\frac{\pi d^3}{6} - \frac{\pi \phi^2 d}{4} \right) \quad (\text{A.3.1})$$

em que, ao volume total da bolha, se subtraiu o volume de gás que realmente não está sujeito à força de impulsão, e que é aproximadamente um cilindro de diâmetro ϕ e altura d (Räbiger e Vogelpohl, 1983).

ii) Quantidade de movimento, F_M

$$F_M = \frac{4\dot{V}_g^2 \rho_g}{\pi \phi^2} \quad (\text{A.3.2})$$

iii) Força de inércia, F_I (Pamperin e Rath, 1995)

$$F_I = -\frac{d}{dt}(m_v v_e) \quad (\text{A.3.3})$$

em que m_v representa a massa virtual da bolha e v_e , a velocidade de expansão da bolha. Quando uma bolha se move num plano perpendicular a uma superfície plana, a sua massa virtual é definida (Davidson e Schüller, 1960) por

$$m_v = M_b + M/2 + 3Md^3/(128b^3) \quad (\text{A.3.4})$$

em que $M_b = \rho_g \pi d^3 / 6$ representa a massa da bolha, $M = \rho \pi d^3 / 6$, a massa de líquido deslocado pela bolha, e b a distância do centro da bolha à superfície plana. Considerando desprezável a massa da bolha, M_b , relativamente a M , e $b \cong (d/2)$, fica simplesmente

$$m_v = 11 \rho (\pi d^3 / 6) / 16 \quad (\text{A.3.5})$$

A velocidade de expansão da bolha, v_e , é definida como

$$v_e = \left[\frac{d(d/2)}{dt} \right] \quad (\text{A.3.6})$$

Substituindo o diâmetro da bolha, d , por $\left[\frac{6 \dot{V}_g t}{\pi} \right]^{1/3}$ e diferenciando, em ordem a t , vem

$$v_e = \frac{\dot{V}_g}{\pi d^2} \quad (\text{A.3.7})$$

Substituindo em (A.3.3) o valor de m_v dado pela equação (A.3.5) e o de v_e , dado pela equação (A.3.7), e diferenciando, obtém-se finalmente

$$F_I = - \frac{11 \rho \dot{V}_g^2}{48 \pi d^2} \quad (\text{A.3.8})$$

iv) Força de arrasto, F_D

$$F_D = -c_D \frac{\pi}{8} d^2 \rho v_R^2 \quad (\text{A.3.9})$$

sendo v_R definida, por Rübiger e Vogelphol (1983), como a velocidade relativa do topo da bolha, durante o processo de formação,

$$v_R = 2v_e + v_B \quad (\text{A.3.10})$$

em função da velocidade de expansão da bolha, v_e , e da velocidade da base da bolha, v_B . A velocidade da base da bolha, v_B , é considerada por Rübiger e Vogelphol como aproximadamente igual, ou pelo menos da mesma ordem de grandeza que a velocidade terminal, no líquido, de uma bolha de diâmetro d . A velocidade terminal de uma esfera (gasosa) de diâmetro d , em movimento num líquido, é definida, a partir da igualdade entre as forças de impulsão e de arrasto, como

$$v_B = \sqrt{\frac{4gd}{3c_D}} \quad (\text{A.3.11})$$

uma vez que $\rho_g \ll \rho$. A determinação do coeficiente de arrasto, c_D , é feita por Rübiger e Vogelphol, de uma forma aproximada, considerando a bolha uma esfera rígida. Nestas condições, pode tomar-se (Brauer, 1971)

$$c_D = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\sqrt{\text{Re}}} + 0,4 \quad (\text{A.3.12})$$

com

$$\text{Re} = \frac{\rho v_B d}{\mu} \quad (\text{A.3.13})$$

O cálculo da velocidade, v_B , tem assim que ser feito por um processo iterativo, a partir das equações (A.3.11) e (A.3.12).

Uma vez calculado o valor de v_B , pode determinar-se a velocidade relativa da bolha, v_R , através da equação (A.3.10), sendo v_e dada pela equação (A.3.7). Voltando à definição da

força de arrasto, aplicada à bolha em formação (equação (A.3.9)), falta apenas determinar o valor do coeficiente de arrasto, para o que se pode utilizar, de igual modo, a equação (A.3.12), com Re definido agora em termos da velocidade relativa da bolha, v_R

$$Re = \frac{\rho v_R d}{\mu} \quad (A.3.14)$$

v) Força de tensão superficial, F_T

$$F_T = -\pi \phi \sigma \quad (A.3.15)$$

Quando o somatório das cinco forças, atrás definidas, se anular, ou seja

$$\Delta \rho g \left(\frac{\pi d_f^3}{6} - \frac{\pi \phi^2 d_f}{4} \right) + \frac{4 \dot{V}_g^2 \rho_g}{\pi \phi^2} - \frac{11 \rho \dot{V}_g^2}{48 \pi d_f^2} - c_D \frac{\pi}{8} d_f^2 \rho v_R^2 - \pi \phi \sigma = 0 \quad (A.3.16)$$

a bolha desprender-se-á do orifício com um diâmetro que aqui foi designado por d_f .

Segundo Råbiger e Vogelphol, como a influência do filamento de gás na força de arrasto não foi contemplada no desenvolvimento feito, é necessário multiplicar a equação (A.3.12) por um factor K , relacionado com as características do sistema, e que pode ser determinado com base em observações experimentais. Devido à mobilidade da interface gás-líquido, Pamperin e Rath (1995) sugerem, igualmente, a correcção do valor do coeficiente de arrasto dado pela equação (A.3.12), por um factor, que é função da relação entre as viscosidades do líquido e do gás.

A equação final de balanço vem, então,

$$\Delta \rho g \left(\frac{\pi d_f^3}{6} - \frac{\pi \phi^2 d_f}{4} \right) + \frac{4 \dot{V}_g^2 \rho_g}{\pi \phi^2} - \frac{11 \rho \dot{V}_g^2}{48 \pi d_f^2} - K c_D \frac{\pi}{8} d_f^2 \rho v_R^2 - \pi \phi \sigma = 0 \quad (A.3.17)$$

A aplicação da equação (A.3.17) a valores experimentais, obtidos por alguns autores (Davidson e Schöler, 1960, Pamperin e Rath, 1995), em orifícios da mesma ordem de grandeza dos utilizados neste trabalho, apontam para um valor de $K = 0,67$, que permite um bom ajuste dos valores publicados. Por isso, foi este o valor utilizado no cálculo de d_f , para as várias condições experimentais (secção 2.5.4).

A resolução da equação (A.3.17) tem que ser feita através de um processo iterativo devido ao cálculo de v_B e v_R .

Para um dado valor de d_f arbitrado, é necessário começar por calcular a velocidade, v_B , da base da bolha com esse diâmetro (equações (A.3.11), (A.3.12) e (A.3.13)). Calculado o valor de v_B , e o valor da velocidade de expansão da bolha, v_e (equação (A.3.7)), pode determinar-se a velocidade relativa da bolha, v_R , pela equação (A.3.10), e o valor do coeficiente de arrasto correspondente (equação (A.3.12), com Re dado pela equação (A.3.14)). Pode, agora, verificar-se a igualdade representada pela equação (A.3.17), já que todas as variáveis são conhecidas. Enquanto a igualdade não se verificar, há que arbitrar novos valores de d_f , para os quais se repetirá todo o cálculo anterior.

Neste trabalho, utilizou-se o método das aproximações sucessivas para determinar o valor do diâmetro final da bolha, para os vários orifícios e caudais de gás.

A.4 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE OXIGÉNIO, NUMA COLUNA DE BORBULHAMENTO, EM ESTADO TRANSITÓRIO

Considere-se uma coluna, como a da figura 4.3, que contém um determinado volume de água, V , com uma concentração inicial de oxigénio dissolvido, C_0 , inferior à concentração de equilíbrio, C^* , com o ar exterior.

Num dado instante, inicia-se o borbulhamento de ar através de um orifício localizado na base da coluna.

As bolhas de ar transferem oxigénio para a água (absorção), pelo que a concentração de oxigénio dissolvido na água vai aumentar. A taxa de transferência de oxigénio, das bolhas para a água, é

$$\dot{n} = (kA)(C^* - C) \quad (\text{A.4.1})$$

em que C representa a concentração média de oxigénio dissolvido na água, nesse instante, k o coeficiente global de transferência de massa (do lado do líquido) e A a área interfacial total. Como se demonstrou no Apêndice A.2, C^* pode ser considerado constante, ao longo da coluna.

A variação do número de moles de oxigénio, na água, é igual à taxa molar definida pela equação (A.4.1), pelo que

$$V \frac{dC}{dt} = (kA)(C^* - C) \quad (\text{A.4.2})$$

ou, rearranjando a equação (A.4.2),

$$\frac{d(C^* - C)}{C^* - C} = -\frac{(kA)}{V} dt \quad (\text{A.4.3})$$

Esta equação pode agora ser integrada entre o instante $t = 0$ ($C = C_0$) e t ($C = C$), resultando

$$\ln \frac{C^* - C}{C^* - C_0} = -\frac{(kA)}{V}t \quad (\text{A.4.4})$$

Se se determinar experimentalmente C_0 (concentração de oxigénio dissolvido para $t = 0$) e C (concentração de oxigénio dissolvido ao fim de um tempo t , suficientemente grande) pode determinar-se o coeficiente global de transferência de massa, (kA) , já que V é conhecido.

O método descrito aplica-se igualmente à determinação do coeficiente global de transferência de massa se, em vez de se dar absorção de oxigénio pela água, estiver a ocorrer desabsorção de oxigénio, por exemplo, para bolhas de azoto.

A.5 ESTIMATIVA DOS VALORES DA CONCENTRAÇÃO DE AZOTO DISSOLVIDO NA COLUNA DE BORBULHAMENTO

Apresenta-se, neste apêndice, o procedimento adoptado para estimar os valores da concentração de azoto dissolvido, necessários para efectuar a simulação da evolução de microbolhas (capítulo 4, secção 4.6), nas condições do estudo experimental.

Considerou-se que o valor da razão entre os coeficientes de transferência do oxigénio e do azoto nas duas colunas seria próximo do valor da razão entre a raiz quadrada das respectivas difusividades. Tal é previsto, nomeadamente, pela teoria da penetração (Higbie, 1935), vulgarmente adoptada no cálculo de coeficientes de transferência de massa, por exemplo, entre bolhas e líquido.

Considere-se o esquema da figura A.5.1, no qual se representa a instalação experimental em que foram realizados os ensaios tipo A, B e C. Nas condições da figura, está a ocorrer absorção de oxigénio no borbulhador principal (com um orifício central), do ar para a água, e desabsorção na outra coluna (2), da água para as bolhas de azoto (ensaio tipo A).

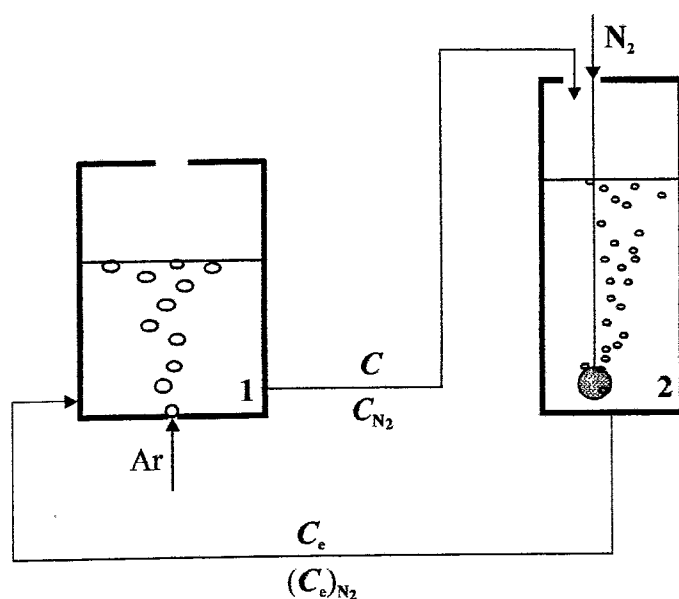


Figura A.5.1 - Absorção de oxigénio na coluna 1

Indicam-se, também, na figura, as concentrações de estado estacionário de oxigénio e azoto dissolvidos, respectivamente C_e e $(C_e)_{N_2}$, à entrada do borbulhador principal, e C e C_{N_2} , à saída do mesmo.

Conhecidas as concentrações C e C_e , e o caudal de recirculação de água, $\dot{v}_L$ (valores medidos experimentalmente), e C^* (solubilidade do oxigénio do ar na água, nas condições do ensaio), o coeficiente global de transferência de oxigénio na coluna 1, $(kA)_{\text{global}}$, é dado por

$$(kA)_{\text{global}} = \frac{\dot{v}_L (C - C_e)}{(C^* - C)} \quad (2.7)$$

Relativamente à coluna 2, vai considerar-se que a pressão parcial de oxigénio nas bolhas de azoto não aumenta significativamente, durante o seu percurso ao longo do líquido. Portanto, a pressão parcial de oxigénio e, conseqüentemente, a concentração que estaria em equilíbrio com essa pressão, C^* , são aproximadamente nulas, em toda a coluna.

Se $(kA)_{\text{global}}^{(2)}$ representar o coeficiente global de transferência de oxigénio na coluna 2, pode dizer-se, então, que

$$\dot{v}_L (C_e - C) = (kA)_{\text{global}}^{(2)} (0 - C_e) \quad (A.5.1)$$

Considerando a razão entre os coeficientes globais de transferência de azoto e de oxigénio igual à razão da raiz quadrada das respectivas difusividades, a equação (2.7) pode ser escrita, em termos do azoto transferido, como

$$\dot{v}_L [C_{N_2} - (C_e)_{N_2}] = 0,87 (kA)_{\text{global}} (C_{N_2}^* - C_{N_2}) \quad (A.5.2)$$

uma vez que $\sqrt{D_{N_2}/D_{O_2}} = 0,87$, a 25°C (Perry e Chilton, 1973). $C_{N_2}^*$ representa a solubilidade do azoto do ar na água, nas condições de temperatura e pressão verificadas.

Na coluna 2, uma vez que o gás é azoto puro (nas condições da figura A.5.1), a concentração de azoto dissolvido no líquido que estaria em equilíbrio com esse gás é diferente do valor de $C_{N_2}^*$, sendo aqui representada por $C_{N_2}^{**}$. À semelhança da equação (A.5.1), pode escrever-se, para o azoto transferido na coluna 2,

$$\dot{v}_L [(C_e)_{N_2} - C_{N_2}] = 0,87 (kA)_{\text{global}}^{(2)} [C_{N_2}^{**} - (C_e)_{N_2}] \quad (\text{A.5.3})$$

Resolvendo simultaneamente as quatro equações ((2.7), (A.5.1), (A.5.2) e (A.5.3)), obtém-se, para qualquer ensaio tipo A, uma estimativa das concentrações de azoto à entrada e à saída do borbulhador principal.

A concentração de azoto à saída do borbulhador poderá ser calculada como

$$C_{N_2} = \frac{C_{N_2}^* (0,87C + 0,13C_e) + C_{N_2}^{**} (C^* - C)}{C^* - 0,13(C - C_e)} \quad (\text{A.5.4})$$

e a concentração de azoto à entrada será

$$(C_e)_{N_2} = C_{N_2} \left(1 + 0,87 \frac{(C - C_e)}{(C^* - C)} \right) - 0,87 \frac{C_{N_2}^* (C - C_e)}{C^* - C} \quad (\text{A.5.5})$$

Se se considerar agora a situação em que ocorre desabsorção de oxigénio da água para uma corrente gasosa de azoto, no borbulhador principal (coluna com o orifício), e absorção de oxigénio do ar pela água, na outra coluna (ensaios tipo C), é possível fazer uma análise idêntica à anterior e estimar, da mesma forma, as concentrações de azoto dissolvido em ambas as colunas.

As equações correspondentes serão, para o oxigénio transferido no borbulhador principal,

$$(kA)_{\text{global}}^d = \frac{\dot{v}_L (C - C_e)}{(0 - C)} \quad (4.6)$$

em que $(kA)_{\text{global}}^d$ representa o coeficiente de transferência de oxigénio da água para a corrente de azoto (desabsorção), e, na coluna 2,

$$\dot{v}_L (C_e - C) = (kA)_{\text{global}}^{(2)} (C^* - C_e) \quad (\text{A.5.6})$$

tendo-se representado por $(kA)_{\text{global}}^{(2)}$ o coeficiente de transferência de oxigénio nesta coluna.

Para o azoto, no borbulhador principal, será possível escrever

$$\dot{v}_L [C_{N_2} - (C_e)_{N_2}] = 0,87 (kA)_{\text{global}}^d (C_{N_2}^{**} - C_{N_2}) \quad (\text{A.5.7})$$

e, finalmente, para a coluna 2,

$$\dot{v}_L [(C_e)_{N_2} - C_{N_2}] = 0,87 ((kA)_{\text{global}}^d)^{(2)} [C_{N_2}^* - (C_e)_{N_2}] \quad (\text{A.5.8})$$

Por resolução simultânea das quatro últimas equações, obtém-se a concentração de azoto à saída do borbulhador principal,

$$C_{N_2} = \frac{C_{N_2}^{**} (C^* - 0,87 C - 0,13 C_e) + C_{N_2}^* C}{C^* - 0,13 (C_e - C)} \quad (\text{A.5.9})$$

que permitirá, por sua vez, calcular directamente a concentração de azoto, à entrada, como

$$(C_e)_{N_2} = C_{N_2} \left(1 + 0,87 \frac{(C_e - C)}{C} \right) - 0,87 \frac{C_{N_2}^{**} (C_e - C)}{C} \quad (\text{A.5.10})$$

B.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

B.1.1 Nota introdutória

Neste Apêndice são apresentados, em tabelas, os valores das variáveis medidas em todos os ensaios realizados, em estado estacionário, para determinação dos vários coeficientes de transferência de oxigénio (ensaio tipo A, tipo B e tipo C, descritos nas secções 2.2.2 *i*) e *ii*) e 4.3.1, respectivamente). Os valores das variáveis que são utilizadas no cálculo de outras variáveis são apresentados com a respectiva incerteza, ditada pela precisão do instrumento de medida utilizado. Exceptuam-se a temperatura e a pressão barométrica, cujas incertezas, constantes em todos os ensaios e iguais a 0,05°C e 1 mbar, respectivamente, se omitiram nas tabelas. Os valores da temperatura e pressão atmosférica são utilizados no cálculo da solubilidade de oxigénio na água, C^* . Usaram-se, como referência, valores publicados (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater Analysis, 1981), para diferentes temperaturas, relativos à pressão de 1013 mbar, e obtidos para água em contacto com ar saturado (100% de humidade). Foi feito um ajuste linear dos valores publicados de C^* , entre 22 e 28°C, inclusivé (7 pontos), resultando, para a pressão absoluta de 1013 mbar,

$$C^* = -0,1521T + 12,179 \quad 22 \leq T \leq 28^\circ\text{C} \quad (\text{B.1.1})$$

(coefic. correlação = 0,99997)

com T em °C e C^* em $(\text{kg} \times 10^{-3})/\text{m}^3$. Para a pressão absoluta P_e , em mbar, o valor corrigido de C^* , $C^*(P_e)$, virá

$$C^*(P_e) = C^* \frac{P_e - p_v}{1013 - p_v} \quad (\text{B.1.2})$$

em que p_v representa a pressão de vapor da água (em mbar), à temperatura T (McCabe *et al.*, 1993)

Neste Apêndice também são apresentados valores de outras variáveis calculadas, nomeadamente coeficientes de transferência de massa. Para cada valor é indicado o valor da incerteza (erro) mais provável.

Se $y = y(x_j)$ representar uma função de m variáveis x_j (com $j = 1, 2, \dots, m$), cujo valor é medido experimentalmente com uma incerteza w_{x_j} , a incerteza mais provável, w_y , associada à variável y será (Holman, 1994, tendo como referência Kline e McClintock, 1953)

$$w_y = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_j} \right)^2 w_{x_j}^2 \right]} \quad (\text{B.1.3})$$

B.1.2 Resultados relativos aos ensaios tipo A - absorção de oxigénio do ar para água

Na tabela B.1.1, representam-se os valores das variáveis medidas nos ensaios tipo A, de absorção do oxigénio do ar para a água, realizados com o orifício de 0,2 mm, utilizando água sem aditivos. Representam-se, para os vários valores adoptados do caudal de borbulhamento, $\dot{V}_g$, e da altura de líquido, h , no borbulhador, os valores da pressão atmosférica, P_e , da temperatura no borbulhador, T_1 , da concentração de oxigénio dissolvido na água à entrada e à saída do borbulhador, C_e e C , respectivamente, da concentração de oxigénio dissolvido na água em equilíbrio com o ar, C^* , e do caudal de circulação, $\dot{v}_L$. Apresentam-se ainda os valores dos respectivos coeficientes globais de transferência de oxigénio, $(kA)_{\text{global}}$, calculados por utilização da equação (2.7).

As tabelas B.1.2 e B.1.3 reúnem os resultados relativos aos ensaios (tipo A) realizados com os orifícios de 0,3 e 3,0 mm, respectivamente.

Os resultados relativos aos ensaios tipo A, com a adição de anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v), à água, são apresentados nas tabelas B.1.4, B.1.5 e B.1.6, para os orifícios de 0,2, 0,3 e 3,0 mm, respectivamente.

Tabela B.1.1 - Resultados experimentais relativos aos ensaios tipo A e coeficientes globais de absorção de oxigénio, em água sem aditivos, para $\phi = 0,2 \text{ mm}$

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	T_1	P_e	$C_e \times 10^3$	$C \times 10^3$	$C^* \times 10^3$	$\dot{v}_L \times 10^6$	$(kA)_{\text{global}} \times 10^6$ ⁽¹⁾
(m³/s)	(mm)	(°C)	(mbar)	(kg/m³)	(kg/m³)	(kg/m³)	(m³/s)	(m³/s)
2,3	60	24,0	1007	$1,55 \pm 0,03$	$3,00 \pm 0,01$	$8,48 \pm 0,01$	$3,74 \pm 0,02$	$0,99 \pm 0,02$
	90	25,0	1001	$0,7 \pm 0,1$	$2,20 \pm 0,03$	$8,28 \pm 0,01$	$4,20 \pm 0,02$	$1,04 \pm 0,07$
	120	24,2	997	$0,8 \pm 0,1$	$2,40 \pm 0,03$	$8,36 \pm 0,01$	$4,20 \pm 0,02$	$1,13 \pm 0,07$
	150	25,0	1018	$1,45 \pm 0,03$	$3,4 \pm 0,1$	$8,42 \pm 0,01$	$3,74 \pm 0,02$	$1,5 \pm 0,1$
	180	25,6	996	$2,4 \pm 0,1$	$3,76 \pm 0,01$	$8,15 \pm 0,01$	$4,39 \pm 0,03$	$1,4 \pm 0,1$
3,7	60	24,0	1007	$1,30 \pm 0,03$	$3,60 \pm 0,01$	$8,48 \pm 0,01$	$3,74 \pm 0,02$	$1,76 \pm 0,02$
	90	25,0	1001	$0,5 \pm 0,1$	$3,2 \pm 0,05$	$8,28 \pm 0,01$	$4,20 \pm 0,02$	$2,2 \pm 0,1$
	120	25,0	997	$0,6 \pm 0,1$	$3,3 \pm 0,05$	$8,24 \pm 0,01$	$4,20 \pm 0,02$	$2,3 \pm 0,1$
	150	24,5	1018	$1,28 \pm 0,03$	$4,1 \pm 0,1$	$8,49 \pm 0,01$	$3,74 \pm 0,02$	$2,4 \pm 0,1$
	180	25,5	996	$2,4 \pm 0,1$	$4,57 \pm 0,01$	$8,16 \pm 0,01$	$4,39 \pm 0,03$	$2,7 \pm 0,1$
5,2	60	24,2	1007	$1,15 \pm 0,03$	$4,00 \pm 0,01$	$8,45 \pm 0,01$	$3,74 \pm 0,02$	$2,54 \pm 0,03$
	90	25,0	1001	$0,5 \pm 0,1$	$3,7 \pm 0,05$	$8,28 \pm 0,01$	$4,20 \pm 0,02$	$2,9 \pm 0,1$
	120	25,0	997	$0,5 \pm 0,1$	$3,8 \pm 0,05$	$8,24 \pm 0,01$	$4,20 \pm 0,02$	$3,1 \pm 0,1$
	150	24,0	1018	$1,20 \pm 0,03$	$4,6 \pm 0,1$	$8,57 \pm 0,01$	$3,74 \pm 0,02$	$3,2 \pm 0,2$
	180	25,5	996	$2,15 \pm 0,1$	$4,88 \pm 0,01$	$8,16 \pm 0,01$	$4,39 \pm 0,03$	$3,7 \pm 0,1$
6,6	60	24,5	1007	$1,06 \pm 0,03$	$4,40 \pm 0,01$	$8,40 \pm 0,01$	$3,74 \pm 0,02$	$3,12 \pm 0,03$
	90	25,0	1001	$0,5 \pm 0,1$	$4,0 \pm 0,05$	$8,28 \pm 0,01$	$4,20 \pm 0,02$	$3,4 \pm 0,1$
	120	25,0	997	$0,5 \pm 0,1$	$4,1 \pm 0,05$	$8,24 \pm 0,01$	$4,20 \pm 0,02$	$3,7 \pm 0,1$
	150	24,0	1018	$1,07 \pm 0,03$	$4,8 \pm 0,1$	$8,57 \pm 0,01$	$3,74 \pm 0,02$	$3,7 \pm 0,2$
	180	25,5	996	$1,9 \pm 0,1$	$4,93 \pm 0,01$	$8,16 \pm 0,01$	$4,39 \pm 0,03$	$4,4 \pm 0,1$
8,0	60	25,0	1007	$1,02 \pm 0,03$	$4,60 \pm 0,01$	$8,33 \pm 0,01$	$3,74 \pm 0,02$	$3,59 \pm 0,04$
	90	24,3	1005	$1,15 \pm 0,03$	$4,8 \pm 0,1$	$8,42 \pm 0,01$	$3,60 \pm 0,02$	$3,6 \pm 0,2$
	120	25,0	1023	$1,05 \pm 0,03$	$5,0 \pm 0,1$	$8,46 \pm 0,01$	$3,70 \pm 0,02$	$4,2 \pm 0,2$
	150	24,5	1018	$1,05 \pm 0,03$	$5,0 \pm 0,1$	$8,49 \pm 0,01$	$3,74 \pm 0,02$	$4,2 \pm 0,2$
	180	25,3	996	$1,7 \pm 0,1$	$5,11 \pm 0,01$	$8,19 \pm 0,01$	$4,39 \pm 0,03$	$4,9 \pm 0,2$

⁽¹⁾ - estes valores são representados, graficamente, em função de h , na figura 2.27 (Capítulo 2)**Tabela B.1.2** - Resultados experimentais relativos aos ensaios tipo A e coeficientes globais de absorção de oxigénio, em água sem aditivos, para $\phi = 0,3 \text{ mm}$

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	T_1	P_e	$C_e \times 10^3$	$C \times 10^3$	$C^* \times 10^3$	$\dot{v}_L \times 10^6$	$(kA)_{\text{global}} \times 10^6$ ⁽¹⁾
(m³/s)	(mm)	(°C)	(mbar)	(kg/m³)	(kg/m³)	(kg/m³)	(m³/s)	(m³/s)
5,0	60	25,0	995	$1,4 \pm 0,1$	$3,20 \pm 0,05$	$8,23 \pm 0,01$	$4,02 \pm 0,02$	$1,4 \pm 0,1$
	90	25,3	995	$1,6 \pm 0,1$	$3,50 \pm 0,05$	$8,18 \pm 0,01$	$4,04 \pm 0,02$	$1,6 \pm 0,1$
	120	25,2	995	$1,6 \pm 0,1$	$3,70 \pm 0,05$	$8,20 \pm 0,01$	$3,97 \pm 0,02$	$1,9 \pm 0,1$
	150	25,2	995	$1,9 \pm 0,1$	$4,10 \pm 0,05$	$8,20 \pm 0,01$	$4,14 \pm 0,02$	$2,2 \pm 0,1$
	180	25,4	991	$1,7 \pm 0,1$	$4,40 \pm 0,05$	$8,13 \pm 0,01$	$3,88 \pm 0,02$	$2,8 \pm 0,1$

⁽¹⁾ - estes valores são representados, graficamente, em função de h , na figura 2.28 (Capítulo 2)

Tabela B.1.2 - CONT.

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	T_1	P_e	$C_e \times 10^3$	$C \times 10^3$	$C^* \times 10^3$	$\dot{v}_L \times 10^6$	$(kA)_{\text{global}} \times 10^6$ ⁽¹⁾
(m³/s)	(mm)	(°C)	(mbar)	(kg/m³)	(kg/m³)	(kg/m³)	(m³/s)	(m³/s)
10	60	25,0	995	1,2 ± 0,1	4,20 ± 0,05	8,23 ± 0,01	4,02 ± 0,02	3,0 ± 0,1
	90	25,3	995	1,2 ± 0,1	4,50 ± 0,05	8,18 ± 0,01	4,04 ± 0,02	3,6 ± 0,2
	120	25,3	995	1,3 ± 0,1	4,70 ± 0,05	8,18 ± 0,01	3,97 ± 0,02	3,9 ± 0,2
	150	25,2	995	1,2 ± 0,1	4,80 ± 0,05	8,20 ± 0,01	4,14 ± 0,02	4,4 ± 0,2
	180	25,4	991	1,2 ± 0,1	5,10 ± 0,05	8,13 ± 0,01	3,88 ± 0,02	5,0 ± 0,2
15	60	25,0	995	1,1 ± 0,1	4,65 ± 0,05	8,23 ± 0,01	4,02 ± 0,02	4,0 ± 0,2
	90	25,0	992	1,0 ± 0,1	4,90 ± 0,05	8,20 ± 0,01	3,88 ± 0,02	4,6 ± 0,2
	120	25,3	995	1,0 ± 0,1	5,00 ± 0,05	8,18 ± 0,01	3,97 ± 0,02	5,0 ± 0,2
	150	25,1	995	1,0 ± 0,1	5,20 ± 0,05	8,21 ± 0,01	4,14 ± 0,02	5,8 ± 0,2
	180	25,3	991	0,9 ± 0,1	5,50 ± 0,05	8,15 ± 0,01	3,88 ± 0,02	6,7 ± 0,3
20	60	25,1	995	1,0 ± 0,1	4,90 ± 0,05	8,21 ± 0,01	4,02 ± 0,02	4,7 ± 0,2
	90	25,0	992	0,8 ± 0,1	5,15 ± 0,05	8,20 ± 0,01	3,88 ± 0,02	5,5 ± 0,2
	120	24,7	992	0,8 ± 0,1	5,50 ± 0,05	8,25 ± 0,01	3,88 ± 0,02	6,6 ± 0,2
	150	25,0	995	0,9 ± 0,1	5,55 ± 0,05	8,23 ± 0,01	4,14 ± 0,02	7,2 ± 0,3
	180	25,2	991	0,7 ± 0,1	5,85 ± 0,05	8,16 ± 0,01	3,88 ± 0,02	8,6 ± 0,3

⁽¹⁾ - estes valores são representados, graficamente, em função de h , na figura 2.28 (Capítulo 2)

Tabela B.1.3 - Resultados experimentais relativos aos ensaios tipo A e coeficientes globais de absorção de oxigénio, em água sem aditivos, para $\phi = 3,0$ mm

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	T_1	P_e	$C_e \times 10^3$	$C \times 10^3$	$C^* \times 10^3$	$\dot{v}_L \times 10^6$	$(kA)_{\text{global}} \times 10^6$ ⁽¹⁾
(m³/s)	(mm)	(°C)	(mbar)	(kg/m³)	(kg/m³)	(kg/m³)	(m³/s)	(m³/s)
20	60	25,1	991	0,82 ± 0,005	4,25 ± 0,01	8,18 ± 0,01	4,22 ± 0,05	3,69 ± 0,05
	90	24,9	998	0,70 ± 0,005	4,3 ± 0,1	8,27 ± 0,01	4,16 ± 0,02	3,8 ± 0,2
	120	24,9	999	0,74 ± 0,005	4,76 ± 0,01	8,27 ± 0,01	4,20 ± 0,04	4,81 ± 0,06
	150	25,1	1007	0,69 ± 0,005	4,9 ± 0,1	8,31 ± 0,01	4,22 ± 0,02	5,2 ± 0,3
	180	25,0	995	0,69 ± 0,005	5,16 ± 0,01	8,23 ± 0,01	4,28 ± 0,04	6,24 ± 0,08
30	60	25,1	991	0,70 ± 0,005	4,80 ± 0,01	8,18 ± 0,01	4,22 ± 0,05	5,13 ± 0,06
	90	25,0	998	0,61 ± 0,005	4,9 ± 0,1	8,25 ± 0,01	4,16 ± 0,02	5,3 ± 0,3
	120	24,9	999	0,62 ± 0,005	5,30 ± 0,01	8,27 ± 0,01	4,20 ± 0,04	6,61 ± 0,08
	150	25,1	1007	0,59 ± 0,005	5,4 ± 0,1	8,31 ± 0,01	4,22 ± 0,02	7,0 ± 0,4
	180	25,1	995	0,53 ± 0,005	5,57 ± 0,01	8,21 ± 0,01	4,28 ± 0,04	8,2 ± 0,1
40	60	25,0	991	0,64 ± 0,005	5,22 ± 0,01	8,19 ± 0,01	4,22 ± 0,05	6,51 ± 0,08
	90	25,1	998	0,54 ± 0,005	5,4 ± 0,1	8,24 ± 0,01	4,16 ± 0,02	7,1 ± 0,4
	120	25,0	999	0,56 ± 0,005	5,74 ± 0,01	8,26 ± 0,01	4,20 ± 0,04	8,6 ± 0,1
	150	25,0	1007	0,54 ± 0,005	5,8 ± 0,1	8,33 ± 0,01	4,22 ± 0,02	8,8 ± 0,5
	180	25,1	995	0,48 ± 0,005	5,90 ± 0,01	8,21 ± 0,01	4,28 ± 0,04	10,0 ± 0,1
48	60	25,0	991	0,60 ± 0,005	5,48 ± 0,01	8,19 ± 0,01	4,22 ± 0,05	7,6 ± 0,1
	90	25,0	998	0,49 ± 0,005	5,8 ± 0,1	8,25 ± 0,01	4,16 ± 0,02	9,0 ± 0,5
	120	25,0	999	0,51 ± 0,005	5,97 ± 0,01	8,26 ± 0,01	4,20 ± 0,04	10,0 ± 0,1
	150	25,0	1007	0,50 ± 0,005	6,1 ± 0,1	8,33 ± 0,01	4,22 ± 0,02	10,6 ± 0,7
	180	25,0	995	0,43 ± 0,005	6,18 ± 0,01	8,23 ± 0,01	4,28 ± 0,04	12,0 ± 0,2

⁽¹⁾ - estes valores são representados, graficamente, em função de h , na figura 2.29 (Capítulo 2)

Tabela B.1.4 - Resultados experimentais relativos aos ensaios tipo A e coeficientes globais de absorção de oxigénio, em água com Fumexol (0,02% v/v), para $\phi = 0,2$ mm

$\dot{V}_g \times 10^6$ (m ³ /s)	h (mm)	T_1 (°C)	P_e (mbar)	$C_e \times 10^3$ (kg/m ³)	$C \times 10^3$ (kg/m ³)	$C^* \times 10^3$ (kg/m ³)	$\dot{v}_L \times 10^6$ (m ³ /s)	$(kA)_{\text{global}} \times 10^6$ (m ³ /s)
2,3	60	24,0	1001	1,1 ± 0,1	2,10 ± 0,03	8,43 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,67 ± 0,07
	90	24,5	1001	1,0 ± 0,1	2,00 ± 0,03	8,35 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,66 ± 0,07
	120	24,0	1001	1,0 ± 0,1	2,15 ± 0,03	8,43 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,77 ± 0,07
	150	24,5	990	1,0 ± 0,1	2,15 ± 0,03	8,26 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,79 ± 0,07
	180	24,5	990	1,0 ± 0,1	2,25 ± 0,03	8,26 ± 0,01	4,21 ± 0,03	0,88 ± 0,07
3,7	60	24,0	1001	0,7 ± 0,1	2,10 ± 0,03	8,43 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,93 ± 0,07
	90	24,5	1001	0,7 ± 0,1	2,05 ± 0,03	8,35 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,90 ± 0,07
	120	24,0	1001	0,9 ± 0,1	2,30 ± 0,03	8,43 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,96 ± 0,07
	150	24,5	990	0,8 ± 0,1	2,35 ± 0,03	8,26 ± 0,01	4,21 ± 0,02	1,10 ± 0,08
	180	24,7	990	0,8 ± 0,1	2,40 ± 0,03	8,23 ± 0,01	4,21 ± 0,03	1,16 ± 0,08
5,2	60	24,0	1001	0,6 ± 0,1	2,30 ± 0,03	8,43 ± 0,01	4,21 ± 0,02	1,17 ± 0,07
	90	24,5	1001	0,6 ± 0,1	2,25 ± 0,03	8,35 ± 0,01	4,21 ± 0,02	1,14 ± 0,07
	120	24,0	1001	0,8 ± 0,1	2,50 ± 0,03	8,43 ± 0,01	4,21 ± 0,02	1,21 ± 0,08
	150	24,5	990	0,7 ± 0,1	2,50 ± 0,03	8,26 ± 0,01	4,21 ± 0,02	1,31 ± 0,08
	180	25,0	990	0,8 ± 0,1	2,65 ± 0,03	8,19 ± 0,01	4,21 ± 0,03	1,41 ± 0,08
6,6	60	24,2	1001	0,7 ± 0,1	2,50 ± 0,03	8,40 ± 0,01	4,21 ± 0,02	1,28 ± 0,08
	90	24,5	1001	0,6 ± 0,1	2,50 ± 0,03	8,35 ± 0,01	4,21 ± 0,02	1,37 ± 0,08
	120	24,0	1001	0,8 ± 0,1	2,80 ± 0,03	8,43 ± 0,01	4,21 ± 0,02	1,50 ± 0,08
	150	25,0	990	0,8 ± 0,1	2,80 ± 0,03	8,19 ± 0,01	4,21 ± 0,02	1,56 ± 0,08
	180	25,0	990	0,8 ± 0,1	2,90 ± 0,03	8,19 ± 0,01	4,21 ± 0,03	1,67 ± 0,09
8,0	60	24,2	1001	0,6 ± 0,1	2,70 ± 0,03	8,40 ± 0,01	4,21 ± 0,02	1,55 ± 0,08
	90	24,2	1001	0,7 ± 0,1	2,90 ± 0,03	8,40 ± 0,01	4,21 ± 0,02	1,68 ± 0,08
	120	24,5	1001	0,9 ± 0,1	3,10 ± 0,05	8,35 ± 0,01	4,21 ± 0,02	1,8 ± 0,1
	150	24,0	1001	0,7 ± 0,1	3,10 ± 0,05	8,43 ± 0,01	4,21 ± 0,02	1,9 ± 0,1
	180	25,0	990	0,8 ± 0,1	3,30 ± 0,05	8,19 ± 0,01	4,21 ± 0,03	2,2 ± 0,1

Tabela B.1.5 - Resultados experimentais relativos aos ensaios tipo A e coeficientes globais de absorção de oxigénio, em água com Fumexol (0,02% v/v), para $\phi = 0,3$ mm

$\dot{V}_g \times 10^6$ (m ³ /s)	h (mm)	T_1 (°C)	P_e (mbar)	$C_e \times 10^3$ (kg/m ³)	$C \times 10^3$ (kg/m ³)	$C^* \times 10^3$ (kg/m ³)	$\dot{v}_L \times 10^6$ (m ³ /s)	$(kA)_{\text{global}} \times 10^6$ (m ³ /s)
5,0	60	25,3	997	1,5 ± 0,1	2,75 ± 0,03	8,20 ± 0,01	4,09 ± 0,02	0,94 ± 0,08
	90	25,3	997	1,7 ± 0,1	2,80 ± 0,03	8,20 ± 0,01	4,15 ± 0,02	0,85 ± 0,09
	120	25,4	1000	1,7 ± 0,1	2,96 ± 0,01	8,21 ± 0,01	4,08 ± 0,02	0,98 ± 0,08
	150	25,0	1001	1,9 ± 0,1	3,40 ± 0,05	8,28 ± 0,01	3,94 ± 0,02	1,2 ± 0,1
	180	25,0	1001	1,9 ± 0,1	3,65 ± 0,05	8,28 ± 0,01	3,92 ± 0,02	1,5 ± 0,1
10	60	25,1	997	1,6 ± 0,1	3,35 ± 0,05	8,21 ± 0,01	4,09 ± 0,02	1,5 ± 0,1
	90	25,3	997	1,5 ± 0,1	3,30 ± 0,05	8,20 ± 0,01	4,15 ± 0,02	1,5 ± 0,1
	120	25,3	1000	1,6 ± 0,1	3,77 ± 0,01	8,22 ± 0,01	4,08 ± 0,02	2,0 ± 0,1
	150	24,9	1001	1,4 ± 0,1	3,90 ± 0,05	8,29 ± 0,01	3,94 ± 0,02	2,3 ± 0,1
	180	24,9	1001	1,5 ± 0,1	4,15 ± 0,05	8,29 ± 0,01	3,92 ± 0,02	2,5 ± 0,1

Tabela B.1.5 - CONT.

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	T_1	P_e	$C_e \times 10^3$	$C \times 10^3$	$C^* \times 10^3$	$\dot{v}_L \times 10^6$	$(kA)_{\text{global}} \times 10^6$
(m ³ /s)	(mm)	(°C)	(mbar)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
15	60	25,1	997	1,7 ± 0,1	3,95 ± 0,05	8,23 ± 0,01	4,09 ± 0,02	2,2 ± 0,1
	90	25,2	997	1,5 ± 0,1	4,00 ± 0,05	8,21 ± 0,01	4,15 ± 0,02	2,5 ± 0,1
	120	25,3	1000	1,6 ± 0,1	4,27 ± 0,01	8,22 ± 0,01	4,08 ± 0,02	2,8 ± 0,1
	150	24,9	1001	1,6 ± 0,1	4,65 ± 0,05	8,29 ± 0,01	3,94 ± 0,02	3,3 ± 0,2
	180	24,8	1001	1,4 ± 0,1	4,75 ± 0,05	8,31 ± 0,01	3,92 ± 0,02	3,7 ± 0,2
20	60	25,1	997	1,9 ± 0,1	4,50 ± 0,05	8,23 ± 0,01	4,09 ± 0,02	2,9 ± 0,1
	90	25,1	997	1,5 ± 0,1	4,55 ± 0,05	8,23 ± 0,01	4,15 ± 0,02	3,4 ± 0,2
	120	25,2	1000	1,6 ± 0,1	4,80 ± 0,01	8,24 ± 0,01	4,08 ± 0,02	3,8 ± 0,1
	150	24,9	1001	1,4 ± 0,1	5,10 ± 0,05	8,29 ± 0,01	3,94 ± 0,02	4,6 ± 0,2
	180	25,0	1001	1,3 ± 0,1	5,20 ± 0,05	8,28 ± 0,01	3,92 ± 0,02	5,0 ± 0,2

Tabela B.1.6 - Resultados experimentais relativos aos ensaios tipo A e coeficientes globais de absorção de oxigénio, em água com Fumexol (0,02% v/v), para $\phi = 3,0$ mm

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	T_1	P_e	$C_e \times 10^3$	$C \times 10^3$	$C^* \times 10^3$	$\dot{v}_L \times 10^6$	$(kA)_{\text{global}} \times 10^6$
(m ³ /s)	(mm)	(°C)	(mbar)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
20	60	25,2	995	1,05 ± 0,03	4,02 ± 0,01	8,20 ± 0,01	4,22 ± 0,05	3,00 ± 0,05
	90	25,1	1000	0,93 ± 0,005	4,0 ± 0,1	8,25 ± 0,01	4,16 ± 0,02	3,0 ± 0,2
	120	24,8	997	1,07 ± 0,03	4,23 ± 0,01	8,27 ± 0,01	4,20 ± 0,04	3,28 ± 0,05
	150	25,1	1007	1,01 ± 0,03	4,23 ± 0,01	8,31 ± 0,01	4,22 ± 0,02	3,33 ± 0,04
	180	25,0	994	1,02 ± 0,03	4,48 ± 0,01	8,22 ± 0,01	4,28 ± 0,04	3,96 ± 0,06
30	60	25,1	995	1,05 ± 0,03	4,58 ± 0,01	8,21 ± 0,01	4,22 ± 0,05	4,11 ± 0,06
	90	25,1	1000	0,91 ± 0,005	4,6 ± 0,1	8,25 ± 0,01	4,16 ± 0,02	4,2 ± 0,2
	120	24,8	997	1,05 ± 0,03	4,79 ± 0,01	8,27 ± 0,01	4,20 ± 0,04	4,51 ± 0,06
	150	25,1	1007	0,97 ± 0,005	4,84 ± 0,01	8,31 ± 0,01	4,22 ± 0,02	4,71 ± 0,04
	180	24,9	994	1,00 ± 0,005	5,04 ± 0,01	8,23 ± 0,01	4,28 ± 0,04	5,42 ± 0,07
40	60	25,1	995	1,02 ± 0,03	4,92 ± 0,01	8,21 ± 0,01	4,22 ± 0,05	5,01 ± 0,07
	90	25,0	1000	0,90 ± 0,005	5,0 ± 0,1	8,27 ± 0,01	4,16 ± 0,02	5,2 ± 0,3
	120	24,8	997	1,05 ± 0,03	5,33 ± 0,01	8,27 ± 0,01	4,20 ± 0,04	6,11 ± 0,08
	150	25,1	1007	0,93 ± 0,005	5,34 ± 0,01	8,31 ± 0,01	4,22 ± 0,02	6,27 ± 0,05
	180	24,9	994	1,00 ± 0,005	5,46 ± 0,01	8,23 ± 0,01	4,28 ± 0,04	6,89 ± 0,08
48	60	25,2	995	1,03 ± 0,03	5,12 ± 0,01	8,20 ± 0,01	4,22 ± 0,05	5,61 ± 0,08
	90	25,0	1000	0,88 ± 0,005	5,3 ± 0,1	8,27 ± 0,01	4,16 ± 0,02	6,2 ± 0,4
	120	24,8	997	0,98 ± 0,005	5,60 ± 0,01	8,27 ± 0,01	4,20 ± 0,04	7,27 ± 0,09
	150	25,0	1007	0,97 ± 0,005	5,63 ± 0,01	8,33 ± 0,01	4,22 ± 0,02	7,29 ± 0,07
	180	25,0	994	1,00 ± 0,005	5,70 ± 0,01	8,22 ± 0,01	4,28 ± 0,04	8,0 ± 0,1

B.1.3 Resultados relativos aos ensaios tipo B - absorção de oxigénio do ar para água, através da superfície livre

Na tabela B.1.7 representam-se os valores das variáveis medidas nos ensaios tipo B, de absorção do oxigénio do ar para a água, através da superfície livre, realizados com o orifício de 0,2 mm, utilizando água sem anti-espuma. Representam-se, para os vários valores adoptados do caudal de borbulhamento, $\dot{V}_g$, e da altura de líquido, h , no borbulhador, os valores da pressão atmosférica, P_e , da temperatura no borbulhador, T_1 , da concentração de oxigénio dissolvido na água à entrada e à saída do borbulhador, C_e e C , respectivamente, da concentração de oxigénio dissolvido na água em equilíbrio com o ar, C^* , e do caudal de circulação, $\dot{v}_L$. Apresentam-se ainda os valores dos respectivos coeficientes de transferência de oxigénio através da superfície livre, $(kA)_{sl}$, calculados por utilização da equação (2.11).

As tabelas B.1.8 e B.1.9 reúnem os resultados relativos aos ensaios de absorção de oxigénio através da superfície livre (ensaios tipo B) realizados com os orifícios de 0,3 e 3,0 mm, respectivamente.

Os resultados obtidos nos ensaios tipo B, com a adição de anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v), à água, são apresentados nas tabelas B.1.10, B.1.11 e B.1.12, para os orifícios de 0,2, 0,3 e 3,0 mm, respectivamente.

Tabela B.1.7 - Resultados experimentais relativos aos ensaios tipo B e coeficientes de absorção de oxigénio através da superfície livre, em água sem aditivos, para $\phi = 0,2$ mm

$\dot{V}_g \times 10^6$ (m ³ /s)	h (mm)	T_1 (°C)	P_e (mbar)	$C_e \times 10^3$ (kg/m ³)	$C \times 10^3$ (kg/m ³)	$C^* \times 10^3$ (kg/m ³)	$\dot{v}_L \times 10^6$ (m ³ /s)	$(kA)_{sl} \times 10^6$ (m ³ /s)
2,3	60	24,0	1007	1,10 ± 0,03	1,5 ± 0,1	8,48 ± 0,01	3,74 ± 0,02	0,35 ± 0,06
	90	24,2	1001	1,03 ± 0,03	1,5 ± 0,1	8,40 ± 0,01	3,60 ± 0,02	0,39 ± 0,06
	120	25,0	997	0,4 ± 0,1	0,65 ± 0,005	8,24 ± 0,01	4,20 ± 0,02	0,22 ± 0,05
	150	24,8	1018	0,88 ± 0,005	1,1 ± 0,1	8,45 ± 0,01	3,74 ± 0,02	0,29 ± 0,06
	180	24,7	1000	0,8 ± 0,1	1,02 ± 0,03	8,31 ± 0,01	4,13 ± 0,02	0,28 ± 0,05
3,7	60	24,0	1007	0,79 ± 0,005	1,3 ± 0,1	8,48 ± 0,01	3,74 ± 0,02	0,50 ± 0,06
	90	24,6	1001	0,82 ± 0,005	1,3 ± 0,1	8,34 ± 0,01	3,60 ± 0,02	0,56 ± 0,07
	120	25,2	997	0,3 ± 0,1	0,50 ± 0,005	8,21 ± 0,01	4,20 ± 0,02	0,24 ± 0,05
	150	24,8	1018	0,60 ± 0,005	0,8 ± 0,1	8,45 ± 0,01	3,74 ± 0,02	0,32 ± 0,07
	180	24,7	1000	0,6 ± 0,1	0,76 ± 0,005	8,31 ± 0,01	4,13 ± 0,02	0,32 ± 0,05

Tabela B.1.7 - CONT.

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	T_1	P_e	$C_e \times 10^3$	$C \times 10^3$	$C^* \times 10^3$	$\dot{v}_L \times 10^6$	$(kA)_{sl} \times 10^6$
(m ³ /s)	(mm)	(°C)	(mbar)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
5,2	60	24,5	1007	0,70 ± 0,005	1,4 ± 0,1	8,40 ± 0,01	3,74 ± 0,02	0,73 ± 0,08
	90	24,6	1001	0,71 ± 0,005	1,3 ± 0,1	8,34 ± 0,01	3,60 ± 0,02	0,71 ± 0,08
	120	25,4	997	0,2 ± 0,1	0,48 ± 0,005	8,18 ± 0,01	4,20 ± 0,02	0,33 ± 0,05
	150	25,0	1018	0,52 ± 0,005	0,6 ± 0,1	8,42 ± 0,01	3,74 ± 0,02	0,26 ± 0,08
	180	24,7	1000	0,5 ± 0,1	0,71 ± 0,005	8,31 ± 0,01	4,13 ± 0,02	0,42 ± 0,05
6,6	60	24,5	1007	0,65 ± 0,005	1,5 ± 0,1	8,40 ± 0,01	3,74 ± 0,02	0,94 ± 0,08
	90	24,8	1001	0,65 ± 0,005	1,3 ± 0,1	8,31 ± 0,01	3,60 ± 0,02	0,82 ± 0,09
	120	25,8	997	0,2 ± 0,1	0,51 ± 0,005	8,12 ± 0,01	4,20 ± 0,02	0,39 ± 0,05
	150	25,2	1018	0,49 ± 0,005	0,6 ± 0,1	8,39 ± 0,01	3,74 ± 0,02	0,31 ± 0,09
	180	24,9	1000	0,5 ± 0,1	0,74 ± 0,005	8,28 ± 0,01	4,13 ± 0,02	0,51 ± 0,05
8,0	60	25,0	1007	0,60 ± 0,005	1,5 ± 0,1	8,33 ± 0,01	3,74 ± 0,02	1,05 ± 0,09
	90	25,0	1005	0,62 ± 0,005	1,3 ± 0,1	8,31 ± 0,01	3,60 ± 0,02	0,87 ± 0,09
	120	25,0	1023	0,5 ± 0,1	1,0 ± 0,1	8,46 ± 0,01	3,70 ± 0,02	0,7 ± 0,1
	150	25,5	1018	0,47 ± 0,005	0,8 ± 0,1	8,34 ± 0,01	3,74 ± 0,02	0,6 ± 0,1
	180	24,9	1000	0,4 ± 0,1	0,73 ± 0,005	8,28 ± 0,01	4,13 ± 0,02	0,59 ± 0,05

Tabela B.1.8 - Resultados experimentais relativos aos ensaios tipo B e coeficientes de absorção de oxigénio através da superfície livre, em água sem aditivos, para $\phi = 0,3$ mm

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	T_1	P_e	$C_e \times 10^3$	$C \times 10^3$	$C^* \times 10^3$	$\dot{v}_L \times 10^6$	$(kA)_{sl} \times 10^6$
(m ³ /s)	(mm)	(°C)	(mbar)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
5,0	60	24,7	1009	0,7 ± 0,1	1,30 ± 0,03	8,39 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,51 ± 0,05
	90	25,2	1009	0,5 ± 0,1	1,10 ± 0,03	8,31 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,51 ± 0,05
	120	24,7	1006	0,5 ± 0,1	1,00 ± 0,005	8,36 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,46 ± 0,05
	150	24,2	1007	0,4 ± 0,1	0,95 ± 0,005	8,45 ± 0,01	3,93 ± 0,02	0,51 ± 0,05
	180	25,2	1007	0,3 ± 0,1	0,90 ± 0,005	8,30 ± 0,01	3,93 ± 0,02	0,59 ± 0,05
10	60	24,5	1009	0,6 ± 0,1	1,20 ± 0,03	8,42 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,71 ± 0,06
	90	24,7	1009	0,3 ± 0,1	1,05 ± 0,03	8,39 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,81 ± 0,06
	120	24,7	1006	0,3 ± 0,1	1,00 ± 0,005	8,36 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,80 ± 0,05
	150	24,2	1007	0,3 ± 0,1	1,05 ± 0,03	8,45 ± 0,01	3,93 ± 0,02	0,90 ± 0,06
	180	25,2	1007	0,3 ± 0,1	0,95 ± 0,005	8,30 ± 0,01	3,93 ± 0,02	0,88 ± 0,05
15	60	24,2	1009	0,4 ± 0,1	1,25 ± 0,03	8,46 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,99 ± 0,06
	90	24,2	1009	0,3 ± 0,1	1,15 ± 0,03	8,46 ± 0,01	3,99 ± 0,02	1,02 ± 0,06
	120	24,7	1006	0,3 ± 0,1	1,05 ± 0,03	8,36 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,99 ± 0,06
	150	24,0	1007	0,3 ± 0,1	1,05 ± 0,03	8,48 ± 0,01	3,93 ± 0,02	1,06 ± 0,06
	180	25,2	1007	0,2 ± 0,1	0,95 ± 0,005	8,30 ± 0,01	3,93 ± 0,02	1,13 ± 0,06
20	60	24,2	1009	0,4 ± 0,1	1,25 ± 0,03	8,46 ± 0,01	3,99 ± 0,02	1,10 ± 0,06
	90	24,2	1009	0,2 ± 0,1	1,10 ± 0,03	8,46 ± 0,01	3,99 ± 0,02	1,14 ± 0,06
	120	24,2	1006	0,2 ± 0,1	1,05 ± 0,03	8,44 ± 0,01	3,99 ± 0,02	1,23 ± 0,06
	150	24,0	1007	0,3 ± 0,1	1,00 ± 0,005	8,48 ± 0,01	3,93 ± 0,02	1,17 ± 0,06
	180	25,2	1007	0,2 ± 0,1	0,90 ± 0,005	8,30 ± 0,01	3,93 ± 0,02	1,27 ± 0,06

Tabela B.1.9 - Resultados experimentais relativos aos ensaios tipo B e coeficientes de absorção de oxigénio através da superfície livre, em água sem aditivos, para $\phi = 3,0$ mm

$\dot{V}_g \times 10^6$ (m ³ /s)	h (mm)	T_1 (°C)	P_e (mbar)	$C_e \times 10^3$ (kg/m ³)	$C \times 10^3$ (kg/m ³)	$C^* \times 10^3$ (kg/m ³)	$\dot{v}_L \times 10^6$ (m ³ /s)	$(kA)_{sl} \times 10^6$ (m ³ /s)
20	60	25,1	991	0,53 ± 0,005	2,11 ± 0,01	8,18 ± 0,01	4,22 ± 0,05	1,77 ± 0,02
	90	24,9	998	0,45 ± 0,005	2,0 ± 0,01	8,27 ± 0,01	4,16 ± 0,02	1,7 ± 0,1
	120	24,9	999	0,53 ± 0,005	2,44 ± 0,01	8,27 ± 0,01	4,20 ± 0,04	2,39 ± 0,02
	150	25,1	1007	0,47 ± 0,005	1,96 ± 0,01	8,31 ± 0,01	4,22 ± 0,02	1,99 ± 0,07
	180	25,0	995	0,44 ± 0,005	2,13 ± 0,01	8,23 ± 0,01	4,28 ± 0,04	2,49 ± 0,03
30	60	25,0	991	0,48 ± 0,005	2,19 ± 0,01	8,19 ± 0,01	4,22 ± 0,05	2,25 ± 0,02
	90	25,0	998	0,40 ± 0,005	2,1 ± 0,01	8,25 ± 0,01	4,16 ± 0,02	2,2 ± 0,1
	120	24,9	999	0,46 ± 0,005	2,46 ± 0,01	8,27 ± 0,01	4,20 ± 0,04	2,98 ± 0,03
	150	25,1	1007	0,42 ± 0,005	1,96 ± 0,01	8,31 ± 0,01	4,22 ± 0,02	2,43 ± 0,09
	180	25,1	995	0,38 ± 0,005	2,10 ± 0,01	8,21 ± 0,01	4,28 ± 0,04	2,99 ± 0,03
40	60	24,9	991	0,45 ± 0,005	2,24 ± 0,01	8,21 ± 0,01	4,22 ± 0,05	2,70 ± 0,03
	90	25,1	998	0,38 ± 0,005	2,1 ± 0,01	8,24 ± 0,01	4,16 ± 0,02	2,7 ± 0,2
	120	25,0	999	0,42 ± 0,005	2,46 ± 0,01	8,26 ± 0,01	4,20 ± 0,04	3,61 ± 0,04
	150	25,0	1007	0,39 ± 0,005	1,96 ± 0,01	8,33 ± 0,01	4,22 ± 0,02	2,9 ± 0,1
	180	25,1	995	0,33 ± 0,005	2,03 ± 0,01	8,21 ± 0,01	4,28 ± 0,04	3,37 ± 0,04
48	60	24,9	991	0,45 ± 0,005	2,30 ± 0,01	8,21 ± 0,01	4,22 ± 0,05	3,08 ± 0,03
	90	25,0	998	0,38 ± 0,005	2,2 ± 0,01	8,25 ± 0,01	4,16 ± 0,02	3,3 ± 0,2
	120	25,0	999	0,40 ± 0,005	2,44 ± 0,01	8,26 ± 0,01	4,20 ± 0,04	4,00 ± 0,04
	150	24,9	1007	0,37 ± 0,005	1,96 ± 0,01	8,34 ± 0,01	4,22 ± 0,02	3,3 ± 0,2
	180	25,0	995	0,33 ± 0,005	1,97 ± 0,01	8,23 ± 0,01	4,28 ± 0,04	3,73 ± 0,05

Tabela B.1.10 - Resultados experimentais relativos aos ensaios tipo B e coeficientes de absorção de oxigénio através da superfície livre, em água com Fumexol (0,02% v/v), para $\phi = 0,2$ mm

$\dot{V}_g \times 10^6$ (m ³ /s)	h (mm)	T_1 (°C)	P_e (mbar)	$C_e \times 10^3$ (kg/m ³)	$C \times 10^3$ (kg/m ³)	$C^* \times 10^3$ (kg/m ³)	$\dot{v}_L \times 10^6$ (m ³ /s)	$(kA)_{sl} \times 10^6$ (m ³ /s)
2,3	60	24,0	1001	1,2 ± 0,1	1,50 ± 0,03	8,43 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,27 ± 0,05
	90	24,2	1001	0,7 ± 0,1	1,10 ± 0,03	8,40 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,29 ± 0,05
	120	24,2	1001	1,0 ± 0,1	1,45 ± 0,03	8,40 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,36 ± 0,05
	150	24,2	1001	0,4 ± 0,1	1,00 ± 0,005	8,40 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,40 ± 0,05
	180	24,7	990	0,7 ± 0,1	1,20 ± 0,03	8,23 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,38 ± 0,06
3,7	60	24,0	1001	0,6 ± 0,1	1,20 ± 0,03	8,43 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,43 ± 0,05
	90	24,2	1001	0,6 ± 0,1	1,05 ± 0,03	8,40 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,34 ± 0,05
	120	24,2	1001	0,8 ± 0,1	1,45 ± 0,03	8,40 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,49 ± 0,05
	150	24,2	1001	0,4 ± 0,1	1,00 ± 0,005	8,40 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,43 ± 0,05
	180	24,7	990	0,5 ± 0,1	1,10 ± 0,03	8,23 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,46 ± 0,06

Tabela B.1.10 - CONT.

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	T_1	P_e	$C_e \times 10^3$	$C \times 10^3$	$C^* \times 10^3$	$\dot{v}_L \times 10^6$	$(kA)_{sl} \times 10^6$
(m ³ /s)	(mm)	(°C)	(mbar)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
5,2	60	24,2	1001	0,4 ± 0,1	0,97 ± 0,005	8,40 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,42 ± 0,05
	90	24,7	1001	0,3 ± 0,1	0,95 ± 0,005	8,32 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,46 ± 0,05
	120	24,2	1001	0,7 ± 0,1	1,30 ± 0,03	8,40 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,49 ± 0,05
	150	24,2	1001	0,3 ± 0,1	0,98 ± 0,005	8,40 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,49 ± 0,05
	180	24,7	990	0,4 ± 0,1	1,05 ± 0,03	8,23 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,51 ± 0,06
6,6	60	24,2	1001	0,4 ± 0,1	0,90 ± 0,005	8,40 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,39 ± 0,05
	90	24,7	1001	0,3 ± 0,1	0,98 ± 0,005	8,32 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,51 ± 0,05
	120	24,7	1001	0,4 ± 0,1	1,15 ± 0,03	8,32 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,59 ± 0,06
	150	24,2	1001	0,3 ± 0,1	0,98 ± 0,005	8,40 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,52 ± 0,05
	180	24,7	990	0,4 ± 0,1	1,00 ± 0,005	8,23 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,51 ± 0,05
8,0	60	24,2	1001	0,2 ± 0,1	0,87 ± 0,005	8,40 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,50 ± 0,05
	90	25,2	1001	0,4 ± 0,1	1,00 ± 0,005	8,25 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,51 ± 0,05
	120	24,7	1001	0,4 ± 0,1	1,05 ± 0,03	8,32 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,55 ± 0,06
	150	24,2	1001	0,3 ± 0,1	1,00 ± 0,005	8,40 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,58 ± 0,05
	180	24,7	990	0,3 ± 0,1	0,99 ± 0,005	8,23 ± 0,01	4,21 ± 0,02	0,61 ± 0,05

Tabela B.1.11 - Resultados experimentais relativos aos ensaios tipo B e coeficientes de absorção de oxigénio através da superfície livre, em água com Fumexol (0,02% v/v), para $\phi = 0,3$ mm

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	T_1	P_e	$C_e \times 10^3$	$C \times 10^3$	$C^* \times 10^3$	$\dot{v}_L \times 10^6$	$(kA)_{sl} \times 10^6$
(m ³ /s)	(mm)	(°C)	(mbar)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
5,0	60	25,0	1006	0,9 ± 0,1	1,45 ± 0,03	8,32 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,43 ± 0,05
	90	24,5	1006	0,7 ± 0,1	1,30 ± 0,03	8,39 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,58 ± 0,05
	120	24,5	1008	0,7 ± 0,1	1,45 ± 0,03	8,41 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,53 ± 0,05
	150	24,0	1008	1,0 ± 0,1	1,60 ± 0,03	8,49 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,51 ± 0,05
	180	24,0	1008	0,8 ± 0,1	1,35 ± 0,03	8,49 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,50 ± 0,05
10	60	24,7	1006	0,5 ± 0,1	1,25 ± 0,03	8,36 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,58 ± 0,05
	90	24,2	1006	0,5 ± 0,1	1,25 ± 0,03	8,44 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,42 ± 0,05
	120	24,5	1008	0,5 ± 0,1	1,35 ± 0,03	8,41 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,72 ± 0,05
	150	24,5	1008	0,6 ± 0,1	1,35 ± 0,03	8,41 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,72 ± 0,05
	180	24,5	1008	0,5 ± 0,1	1,20 ± 0,03	8,41 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,69 ± 0,05
15	60	24,5	1006	0,4 ± 0,1	1,15 ± 0,03	8,39 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,65 ± 0,05
	90	24,0	1006	0,4 ± 0,1	1,20 ± 0,03	8,47 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,73 ± 0,05
	120	24,5	1008	0,4 ± 0,1	1,30 ± 0,03	8,41 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,85 ± 0,05
	150	24,5	1008	0,4 ± 0,1	1,25 ± 0,03	8,41 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,90 ± 0,06
	180	24,5	1008	0,4 ± 0,1	1,15 ± 0,03	8,41 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,86 ± 0,06
20	60	24,5	1006	0,4 ± 0,1	1,10 ± 0,03	8,39 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,71 ± 0,06
	90	24,5	1006	0,6 ± 0,1	1,15 ± 0,03	8,39 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,73 ± 0,06
	120	24,5	1008	0,4 ± 0,1	1,20 ± 0,03	8,41 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,92 ± 0,06
	150	24,5	1008	0,3 ± 0,1	1,10 ± 0,03	8,41 ± 0,01	3,99 ± 0,02	0,98 ± 0,06
	180	25,0	1008	0,4 ± 0,1	1,15 ± 0,03	8,33 ± 0,01	3,99 ± 0,02	1,05 ± 0,06

Tabela B.1.12 - Resultados experimentais relativos aos ensaios tipo B e coeficientes de absorção de oxigénio através da superfície livre, em água com Fumexol (0,02% v/v), para $\phi = 3,0$ mm

$\dot{V}_g \times 10^6$ (m ³ /s)	h (mm)	T_1 (°C)	P_e (mbar)	$C_e \times 10^3$ (kg/m ³)	$C \times 10^3$ (kg/m ³)	$C^* \times 10^3$ (kg/m ³)	$\dot{v}_L \times 10^6$ (m ³ /s)	$(kA)_{sl} \times 10^6$ (m ³ /s)
20	60	25,1	993	0,79 ± 0,005	2,09 ± 0,01	8,20 ± 0,01	4,22 ± 0,05	1,44 ± 0,02
	90	24,8	995	0,62 ± 0,005	1,9 ± 0,1	8,26 ± 0,01	4,16 ± 0,02	1,3 ± 0,1
	120	24,9	999	0,76 ± 0,005	2,15 ± 0,01	8,27 ± 0,01	4,20 ± 0,04	1,56 ± 0,02
	150	24,9	1004	0,67 ± 0,005	1,96 ± 0,01	8,32 ± 0,01	4,22 ± 0,02	1,44 ± 0,01
	180	24,9	996	0,62 ± 0,005	1,92 ± 0,01	8,25 ± 0,01	4,28 ± 0,04	1,60 ± 0,02
30	60	25,1	993	0,70 ± 0,005	2,18 ± 0,01	8,20 ± 0,01	4,22 ± 0,05	1,85 ± 0,02
	90	24,8	995	0,57 ± 0,005	2,0 ± 0,1	8,26 ± 0,01	4,16 ± 0,02	1,7 ± 0,1
	120	25,0	999	0,69 ± 0,005	2,29 ± 0,01	8,26 ± 0,01	4,20 ± 0,04	2,07 ± 0,02
	150	25,0	1004	0,63 ± 0,005	1,96 ± 0,01	8,30 ± 0,01	4,22 ± 0,02	1,79 ± 0,02
	180	25,0	996	0,54 ± 0,005	1,92 ± 0,01	8,24 ± 0,01	4,28 ± 0,04	1,98 ± 0,02
40	60	25,0	993	0,66 ± 0,005	2,30 ± 0,01	8,21 ± 0,01	4,22 ± 0,05	2,25 ± 0,03
	90	24,9	995	0,54 ± 0,005	2,1 ± 0,1	8,24 ± 0,01	4,16 ± 0,02	2,1 ± 0,1
	120	25,0	999	0,67 ± 0,005	2,40 ± 0,01	8,26 ± 0,01	4,20 ± 0,04	2,66 ± 0,03
	150	24,9	1004	0,61 ± 0,005	1,96 ± 0,01	8,32 ± 0,01	4,22 ± 0,02	2,16 ± 0,02
	180	24,9	996	0,50 ± 0,005	1,88 ± 0,01	8,25 ± 0,01	4,28 ± 0,04	2,29 ± 0,03
48	60	25,0	993	0,62 ± 0,005	2,37 ± 0,01	8,21 ± 0,01	4,22 ± 0,05	2,52 ± 0,03
	90	24,9	995	0,52 ± 0,005	2,2 ± 0,1	8,24 ± 0,01	4,16 ± 0,02	2,5 ± 0,2
	120	24,9	999	0,66 ± 0,005	2,54 ± 0,01	8,27 ± 0,01	4,20 ± 0,04	3,19 ± 0,03
	150	24,9	1004	0,57 ± 0,005	1,96 ± 0,01	8,32 ± 0,01	4,22 ± 0,02	2,42 ± 0,02
	180	25,1	996	0,48 ± 0,005	1,88 ± 0,01	8,22 ± 0,01	4,28 ± 0,04	2,56 ± 0,03

B.1.4 Resultados relativos aos ensaios tipo C - desabsorção de oxigénio da água, com azoto

Na tabela B.1.13 representam-se os valores das variáveis medidas nos ensaios tipo C, de desabsorção do oxigénio da água para uma corrente de azoto, realizados com o orifício de 0,2 mm, utilizando água sem anti-espuma. Representam-se, para os vários valores adoptados do caudal de borbulhamento, $\dot{V}_g$ e da altura de líquido, h , no borbulhador, os valores da pressão atmosférica, P_e , da temperatura no borbulhador, T_1 , da concentração de oxigénio dissolvido na água à entrada e à saída do borbulhador C_e e C , respectivamente, e do caudal de

circulação, $\dot{v}_L$. Apresentam-se ainda os valores dos respectivos coeficientes globais de desabsorção de oxigénio, $(kA)_{\text{global}}^d$, calculados por utilização da equação (4.6).

As tabelas B.1.14 e B.1.15 reúnem os resultados relativos aos ensaios de desabsorção de oxigénio (ensaio tipo C) realizados com os orifícios de 0,3 e 3,0 mm, respectivamente.

Os resultados obtidos nos ensaios tipo C, com a adição de anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v), à água, são apresentados nas tabelas B.1.16, B.1.17 e B.1.18, para os orifícios de 0,2, 0,3 e 3,0 mm, respectivamente.

Tabela B.1.13 - Resultados experimentais relativos aos ensaios tipo C e coeficientes globais de desabsorção de oxigénio, em água sem aditivos, para $\phi = 0,2$ mm

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	T_1	P_e	$C_e \times 10^3$	$C \times 10^3$	$\dot{v}_L \times 10^6$	$(kA)_{\text{global}}^d \times 10^6$ ⁽¹⁾
(m ³ /s)	(mm)	(°C)	(mbar)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
2,3	60	25,2	1003	6,3 ± 0,1	5,79 ± 0,01	4,36 ± 0,03	0,38 ± 0,08
	90	25,3	1003	6,2 ± 0,1	5,55 ± 0,01	4,17 ± 0,02	0,49 ± 0,08
	120	25,5	1001	6,1 ± 0,1	5,10 ± 0,01	4,12 ± 0,02	0,81 ± 0,08
	150	25,3	1001	6,0 ± 0,1	5,02 ± 0,01	4,10 ± 0,02	0,80 ± 0,08
	180	25,4	1001	6,0 ± 0,1	4,65 ± 0,01	4,18 ± 0,03	1,21 ± 0,09
3,7	60	25,2	1003	6,3 ± 0,1	5,27 ± 0,01	4,36 ± 0,03	0,85 ± 0,08
	90	25,3	1003	5,9 ± 0,1	4,62 ± 0,01	4,17 ± 0,02	1,16 ± 0,09
	120	25,5	1001	5,8 ± 0,1	4,08 ± 0,01	4,12 ± 0,02	1,7 ± 0,1
	150	25,3	1001	6,0 ± 0,1	3,86 ± 0,01	4,10 ± 0,02	2,3 ± 0,1
	180	25,4	1001	5,7 ± 0,1	3,79 ± 0,01	4,18 ± 0,03	2,1 ± 0,1
5,2	60	25,2	1003	6,2 ± 0,1	4,85 ± 0,01	4,36 ± 0,03	1,21 ± 0,09
	90	25,3	1003	5,9 ± 0,1	4,25 ± 0,01	4,17 ± 0,02	1,6 ± 0,1
	120	25,4	1001	5,9 ± 0,1	3,77 ± 0,01	4,12 ± 0,02	2,3 ± 0,1
	150	25,3	1001	6,0 ± 0,1	3,58 ± 0,01	4,10 ± 0,02	2,8 ± 0,1
	180	25,4	1001	6,0 ± 0,1	3,50 ± 0,01	4,18 ± 0,03	3,0 ± 0,1
6,6	60	25,2	1003	6,3 ± 0,1	4,65 ± 0,01	4,36 ± 0,03	1,6 ± 0,1
	90	25,1	1003	6,0 ± 0,1	4,18 ± 0,01	4,17 ± 0,02	1,8 ± 0,1
	120	25,3	1001	6,0 ± 0,1	3,57 ± 0,01	4,12 ± 0,02	2,8 ± 0,1
	150	25,4	1001	6,1 ± 0,1	3,43 ± 0,01	4,10 ± 0,02	3,2 ± 0,1
	180	25,4	1001	6,3 ± 0,1	3,33 ± 0,01	4,18 ± 0,03	3,7 ± 0,1
8,0	60	25,2	1003	6,4 ± 0,1	4,55 ± 0,01	4,36 ± 0,03	1,8 ± 0,1
	90	24,8	1003	6,2 ± 0,1	4,10 ± 0,01	4,17 ± 0,02	2,1 ± 0,1
	120	25,0	1001	6,2 ± 0,1	3,54 ± 0,01	4,12 ± 0,02	3,1 ± 0,1
	150	25,3	1001	6,2 ± 0,1	3,33 ± 0,01	4,10 ± 0,02	3,5 ± 0,1
	180	25,1	1001	6,4 ± 0,1	3,23 ± 0,01	4,18 ± 0,03	4,1 ± 0,1

⁽¹⁾ - estes valores são representados, graficamente, em função de h , na figura 5.1 (Capítulo 5)

Tabela B.1.14 - Resultados experimentais relativos aos ensaios tipo C e coeficientes globais de desabsorção de oxigénio, em água sem aditivos, para $\phi = 0,3 \text{ mm}$

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	T_1	P_e	$C_e \times 10^3$	$C \times 10^3$	$\dot{v}_L \times 10^6$	$(kA)_{\text{global}}^d \times 10^6^{(1)}$
(m ³ /s)	(mm)	(°C)	(mbar)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
5,0	60	25,1	998	6,5 ± 0,1	4,70 ± 0,05	3,93 ± 0,02	1,5 ± 0,1
	90	25,1	998	6,3 ± 0,1	4,60 ± 0,05	4,08 ± 0,02	1,5 ± 0,1
	120	24,9	999	6,7 ± 0,1	4,65 ± 0,05	3,87 ± 0,02	1,7 ± 0,1
	150	25,0	999	6,5 ± 0,1	4,40 ± 0,05	4,04 ± 0,02	1,9 ± 0,1
	180	25,2	997	6,2 ± 0,1	4,15 ± 0,05	4,10 ± 0,02	2,0 ± 0,1
10	60	24,8	998	6,7 ± 0,1	3,75 ± 0,05	3,93 ± 0,02	3,1 ± 0,1
	90	25,1	998	6,5 ± 0,1	3,70 ± 0,05	4,08 ± 0,02	3,1 ± 0,2
	120	25,0	999	6,8 ± 0,1	3,50 ± 0,05	4,02 ± 0,02	3,8 ± 0,2
	150	24,9	999	6,6 ± 0,1	3,35 ± 0,05	4,04 ± 0,02	3,9 ± 0,2
	180	25,1	997	6,5 ± 0,1	3,10 ± 0,05	4,10 ± 0,02	4,5 ± 0,2
15	60	24,9	998	7,0 ± 0,1	3,60 ± 0,05	3,93 ± 0,02	3,7 ± 0,2
	90	25,0	998	6,7 ± 0,1	3,30 ± 0,05	4,08 ± 0,02	4,2 ± 0,2
	120	24,9	999	6,9 ± 0,1	3,25 ± 0,05	4,10 ± 0,02	4,6 ± 0,2
	150	24,9	999	6,9 ± 0,1	3,00 ± 0,03	4,04 ± 0,02	5,2 ± 0,2
	180	25,1	997	6,8 ± 0,1	2,80 ± 0,03	4,10 ± 0,02	5,9 ± 0,2
20	60	24,9	998	7,2 ± 0,1	3,25 ± 0,05	3,93 ± 0,02	4,8 ± 0,2
	90	24,9	998	6,8 ± 0,1	3,00 ± 0,03	4,08 ± 0,02	5,2 ± 0,2
	120	24,9	999	7,0 ± 0,1	2,90 ± 0,03	4,10 ± 0,02	5,8 ± 0,2
	150	24,9	999	7,0 ± 0,1	2,65 ± 0,03	4,04 ± 0,02	6,6 ± 0,2
	180	24,9	997	7,0 ± 0,1	2,45 ± 0,03	4,10 ± 0,02	7,6 ± 0,2

⁽¹⁾ - estes valores são representados, graficamente, em função de h , na figura 5.2 (Capítulo 5)

Tabela B.1.15 - Resultados experimentais relativos aos ensaios tipo C e coeficientes globais de desabsorção de oxigénio, em água sem aditivos, para $\phi = 3,0 \text{ mm}$

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	T_1	P_e	$C_e \times 10^3$	$C \times 10^3$	$\dot{v}_L \times 10^6$	$(kA)_{\text{global}}^d \times 10^6^{(1)}$
(m ³ /s)	(mm)	(°C)	(mbar)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
20	60	25,0	1002	6,9 ± 0,1	4,42 ± 0,01	4,23 ± 0,04	2,4 ± 0,1
	90	25,2	1002	7,0 ± 0,1	4,35 ± 0,01	4,27 ± 0,03	2,6 ± 0,1
	120	25,2	1002	7,4 ± 0,1	4,44 ± 0,01	4,38 ± 0,03	2,9 ± 0,1
	150	25,2	1002	7,4 ± 0,1	4,28 ± 0,01	4,40 ± 0,03	3,2 ± 0,1
	180	25,2	1002	7,4 ± 0,1	4,34 ± 0,01	4,22 ± 0,03	3,0 ± 0,1
30	60	25,0	1002	7,0 ± 0,1	3,72 ± 0,01	4,23 ± 0,04	3,7 ± 0,1
	90	25,2	1002	7,3 ± 0,1	3,77 ± 0,01	4,27 ± 0,03	4,0 ± 0,1
	120	25,2	1002	7,5 ± 0,1	3,76 ± 0,01	4,38 ± 0,03	4,4 ± 0,1
	150	25,2	1002	7,5 ± 0,1	3,68 ± 0,01	4,40 ± 0,03	4,6 ± 0,1
	180	25,2	1002	7,5 ± 0,1	3,55 ± 0,01	4,22 ± 0,03	4,7 ± 0,1

⁽¹⁾ - estes valores são representados, graficamente, em função de h , na figura 5.3 (Capítulo 5)

Tabela B.1.15 - CONT.

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	T_1	P_e	$C_e \times 10^3$	$C \times 10^3$	$\dot{v}_L \times 10^6$	$(kA)_{\text{global}}^d \times 10^6$ ⁽¹⁾
(m ³ /s)	(mm)	(°C)	(mbar)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
40	60	24,9	1002	7,3 ± 0,1	3,37 ± 0,01	4,23 ± 0,04	4,9 ± 0,1
	90	25,2	1002	7,4 ± 0,1	3,37 ± 0,01	4,27 ± 0,03	5,1 ± 0,1
	120	25,2	1002	7,5 ± 0,1	3,28 ± 0,01	4,38 ± 0,03	5,6 ± 0,1
	150	25,2	1002	7,4 ± 0,1	3,15 ± 0,01	4,11 ± 0,03	5,6 ± 0,1
	180	25,2	1002	7,7 ± 0,1	3,18 ± 0,01	4,22 ± 0,03	6,0 ± 0,1
48	60	24,9	1002	7,4 ± 0,1	3,07 ± 0,01	4,23 ± 0,04	6,0 ± 0,2
	90	25,4	1002	7,4 ± 0,1	3,00 ± 0,01	4,27 ± 0,03	6,3 ± 0,2
	120	25,2	1002	7,5 ± 0,1	3,00 ± 0,01	4,38 ± 0,03	6,6 ± 0,2
	150	25,2	1002	7,5 ± 0,1	2,83 ± 0,01	4,11 ± 0,03	6,8 ± 0,2
	180	25,2	1002	7,8 ± 0,1	2,88 ± 0,01	4,22 ± 0,03	7,2 ± 0,2

(1) - estes valores são representados, graficamente, em função de h , na figura 5.3 (Capítulo 5)

Tabela B.1.16 - Resultados experimentais relativos aos ensaios tipo C e coeficientes globais de desabsorção de oxigénio, em água com Fumexol (0,02% v/v), para $\phi = 0,2 \text{ mm}$

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	T_1	P_e	$C_e \times 10^3$	$C \times 10^3$	$\dot{v}_L \times 10^6$	$(kA)_{\text{global}}^d \times 10^6$
(m ³ /s)	(mm)	(°C)	(mbar)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
2,3	60	25,0	988	6,6 ± 0,1	6,33 ± 0,01	4,08 ± 0,03	0,17 ± 0,07
	90	25,0	990	6,7 ± 0,1	5,94 ± 0,01	4,07 ± 0,03	0,52 ± 0,07
	120	25,1	994	6,3 ± 0,1	5,73 ± 0,01	4,03 ± 0,03	0,40 ± 0,07
	150	25,2	994	6,1 ± 0,1	5,57 ± 0,01	4,20 ± 0,03	0,40 ± 0,08
	180	25,1	991	5,8 ± 0,1	5,07 ± 0,01	4,21 ± 0,03	0,61 ± 0,08
3,7	60	25,0	988	6,5 ± 0,1	6,04 ± 0,01	4,08 ± 0,03	0,31 ± 0,07
	90	25,0	990	6,3 ± 0,1	5,17 ± 0,01	4,07 ± 0,03	0,89 ± 0,08
	120	25,1	994	6,0 ± 0,1	5,16 ± 0,01	4,03 ± 0,03	0,66 ± 0,08
	150	25,2	994	5,8 ± 0,1	4,48 ± 0,01	4,20 ± 0,03	1,2 ± 0,1
	180	25,2	991	5,6 ± 0,1	4,37 ± 0,01	4,21 ± 0,03	1,2 ± 0,1
5,2	60	25,0	988	6,3 ± 0,1	5,78 ± 0,01	4,08 ± 0,03	0,37 ± 0,07
	90	25,0	990	6,2 ± 0,1	5,04 ± 0,01	4,07 ± 0,03	0,94 ± 0,08
	120	25,1	994	6,1 ± 0,1	4,85 ± 0,01	4,03 ± 0,03	1,04 ± 0,08
	150	25,2	994	5,8 ± 0,1	4,57 ± 0,01	4,20 ± 0,03	1,13 ± 0,09
	180	25,3	991	5,7 ± 0,1	4,36 ± 0,01	4,21 ± 0,03	1,3 ± 0,1
6,6	60	25,0	988	6,3 ± 0,1	5,55 ± 0,01	4,08 ± 0,03	0,55 ± 0,07
	90	25,0	990	6,2 ± 0,1	4,96 ± 0,01	4,07 ± 0,03	1,02 ± 0,08
	120	25,1	994	6,1 ± 0,1	4,73 ± 0,01	4,03 ± 0,03	1,17 ± 0,09
	150	25,2	994	5,9 ± 0,1	4,57 ± 0,01	4,20 ± 0,03	1,22 ± 0,09
	180	25,2	991	6,0 ± 0,1	4,54 ± 0,01	4,21 ± 0,03	1,35 ± 0,09
8,0	60	25,0	988	6,3 ± 0,1	5,45 ± 0,01	4,08 ± 0,03	0,64 ± 0,08
	90	25,0	990	6,2 ± 0,1	4,85 ± 0,01	4,07 ± 0,03	1,13 ± 0,09
	120	25,1	994	6,1 ± 0,1	4,64 ± 0,01	4,03 ± 0,03	1,27 ± 0,09
	150	25,2	994	6,0 ± 0,1	4,58 ± 0,01	4,20 ± 0,03	1,30 ± 0,09
	180	25,1	991	6,0 ± 0,1	4,46 ± 0,01	4,21 ± 0,03	1,5 ± 0,1

Tabela B.1.17 - Resultados experimentais relativos aos ensaios tipo C e coeficientes globais de desabsorção de oxigénio, em água com Fumexol (0,02% v/v), para $\phi = 0,3$ mm

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	T_1	P_e	$C_e \times 10^3$	$C \times 10^3$	$\dot{v}_L \times 10^6$	$(kA)_{\text{global}}^d \times 10^6$
(m ³ /s)	(mm)	(°C)	(mbar)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
5,0	60	25,3	999	6,3 ± 0,1	5,70 ± 0,05	4,27 ± 0,02	0,45 ± 0,09
	90	25,2	999	6,4 ± 0,1	5,75 ± 0,05	4,17 ± 0,02	0,47 ± 0,08
	120	25,1	999	6,2 ± 0,1	5,15 ± 0,05	4,17 ± 0,02	0,9 ± 0,1
	150	25,1	999	6,4 ± 0,1	5,00 ± 0,05	4,22 ± 0,02	1,2 ± 0,1
	180	25,3	999	6,1 ± 0,1	4,85 ± 0,05	4,20 ± 0,02	1,1 ± 0,1
10	60	25,2	999	6,1 ± 0,1	5,10 ± 0,05	4,27 ± 0,02	0,8 ± 0,1
	90	25,2	999	6,1 ± 0,1	4,90 ± 0,05	4,17 ± 0,02	1,0 ± 0,1
	120	25,1	999	6,0 ± 0,1	4,55 ± 0,05	4,17 ± 0,02	1,3 ± 0,1
	150	25,1	999	6,4 ± 0,1	4,35 ± 0,05	4,22 ± 0,02	2,0 ± 0,1
	180	25,3	999	6,2 ± 0,1	4,25 ± 0,05	4,20 ± 0,02	1,9 ± 0,1
15	60	25,2	999	6,0 ± 0,1	4,45 ± 0,05	4,27 ± 0,02	1,5 ± 0,1
	90	25,1	999	6,0 ± 0,1	4,25 ± 0,05	4,17 ± 0,02	1,7 ± 0,1
	120	25,1	999	6,1 ± 0,1	3,95 ± 0,05	4,17 ± 0,02	2,3 ± 0,1
	150	25,1	999	6,2 ± 0,1	3,80 ± 0,05	4,22 ± 0,02	2,7 ± 0,1
	180	25,2	999	6,3 ± 0,1	3,65 ± 0,05	4,20 ± 0,02	3,1 ± 0,2
20	60	25,3	999	6,0 ± 0,1	4,10 ± 0,05	4,27 ± 0,02	2,0 ± 0,1
	90	25,1	999	6,1 ± 0,1	3,80 ± 0,05	4,17 ± 0,02	2,5 ± 0,1
	120	25,1	999	6,0 ± 0,1	3,55 ± 0,05	4,17 ± 0,02	2,9 ± 0,2
	150	25,0	999	6,3 ± 0,1	3,35 ± 0,05	4,22 ± 0,02	3,7 ± 0,2
	180	25,1	999	6,3 ± 0,1	3,10 ± 0,05	4,20 ± 0,02	4,3 ± 0,2

Tabela B.1.18 - Resultados experimentais relativos aos ensaios tipo C e coeficientes globais de desabsorção de oxigénio, em água com Fumexol (0,02% v/v), para $\phi = 3,0$ mm

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	T_1	P_e	$C_e \times 10^3$	$C \times 10^3$	$\dot{v}_L \times 10^6$	$(kA)_{\text{global}}^d \times 10^6$
(m ³ /s)	(mm)	(°C)	(mbar)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
20	60	24,8	995	6,5 ± 0,1	4,64 ± 0,01	4,51 ± 0,03	1,8 ± 0,1
	90	25,0	990	6,4 ± 0,1	4,24 ± 0,01	4,26 ± 0,03	2,2 ± 0,1
	120	25,0	990	6,8 ± 0,1	4,20 ± 0,01	4,47 ± 0,03	2,8 ± 0,1
	150	25,4	990	6,8 ± 0,1	4,11 ± 0,01	4,35 ± 0,02	2,9 ± 0,1
	180	25,0	989	7,1 ± 0,1	4,04 ± 0,01	4,47 ± 0,02	3,4 ± 0,1
30	60	25,0	995	6,6 ± 0,1	4,19 ± 0,01	4,51 ± 0,03	2,6 ± 0,1
	90	25,0	990	6,6 ± 0,1	3,84 ± 0,01	4,26 ± 0,03	3,1 ± 0,1
	120	25,0	990	6,7 ± 0,1	3,72 ± 0,01	4,47 ± 0,03	3,6 ± 0,1
	150	25,2	990	6,5 ± 0,1	3,45 ± 0,01	4,35 ± 0,02	3,9 ± 0,1
	180	25,0	989	7,3 ± 0,1	3,64 ± 0,01	4,47 ± 0,02	4,5 ± 0,1

Tabela B.1.18 - Resultados experimentais relativos aos ensaios tipo C e coeficientes globais de desabsorção de oxigénio, em água com Fumexol (0,02% v/v), para $\phi = 3,0$ mm

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	T_1	P_e	$C_e \times 10^3$	$C \times 10^3$	$\dot{v}_L \times 10^6$	$(kA)_{\text{global}}^d \times 10^6$
(m ³ /s)	(mm)	(°C)	(mbar)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
40	60	25,1	995	6,6 ± 0,1	3,76 ± 0,01	4,51 ± 0,03	3,4 ± 0,1
	90	24,8	990	6,6 ± 0,1	3,44 ± 0,01	4,26 ± 0,03	3,9 ± 0,1
	120	25,0	990	6,7 ± 0,1	3,19 ± 0,01	4,47 ± 0,03	4,9 ± 0,2
	150	25,0	990	6,5 ± 0,1	3,06 ± 0,01	4,35 ± 0,02	4,9 ± 0,2
	180	25,0	989	7,2 ± 0,1	3,22 ± 0,01	4,52 ± 0,03	5,6 ± 0,2
48	60	25,1	995	6,7 ± 0,1	3,43 ± 0,01	4,51 ± 0,03	4,3 ± 0,1
	90	24,8	990	6,6 ± 0,1	3,14 ± 0,01	4,26 ± 0,03	4,7 ± 0,1
	120	24,6	990	6,7 ± 0,1	2,93 ± 0,01	4,47 ± 0,03	5,8 ± 0,2
	150	25,0	990	6,5 ± 0,1	2,80 ± 0,01	4,35 ± 0,02	5,8 ± 0,2
	180	25,0	989	7,2 ± 0,1	2,93 ± 0,01	4,52 ± 0,03	6,6 ± 0,2

B.1.5 Valores de $(kA)_{\text{sl}}$, $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ e $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$

Na tabela B.1.19 são apresentados os valores de $(kA)_{\text{sl}}$, determinados por utilização da equação (2.11.a), a partir dos resultados dos ensaios tipo B e tipo C realizados com água (sem aditivos), utilizando o orifício de 0,2 mm. Por subtracção desses valores de $(kA)_{\text{sl}}$ aos correspondentes valores de $(kA)_{\text{global}}$ (ensaios tipo A), obtiveram-se os valores de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$, apresentados na 4ª coluna da tabela B.1.19. As tabelas B.1.20 e B.1.21 dizem respeito aos orifícios de 0,3 e 3,0 mm, respectivamente, sendo ainda apresentados os valores de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$, obtidos para estes orifícios.

Nas tabelas B.1.22, B.1.23 e B.1.24 apresentam-se os valores de $(kA)_{\text{sl}}$ e $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ determinados a partir dos resultados dos ensaios realizados com os orifícios de 0,2, 0,3 e 3,0 mm, respectivamente, com água a que foi adicionado anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v). Os valores de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ obtidos para os orifícios de 0,3 e 3,0 mm são igualmente apresentados nas tabelas B.1.23 e B.1.24, respectivamente.

Tabela B.1.19 - Valores de $(kA)_{sl}$, $[(kA)_{global} - (kA)_{sl}]$ e $[(kA)_{global}^d - (kA)_{sl}]$ relativos aos ensaios realizados com água sem aditivos, para $\phi = 0,2 \text{ mm}$

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	$(kA)_{sl} \times 10^6^{(1)}$	$[(kA)_{global} - (kA)_{sl}] \times 10^6^{(2)}$
(m ³ /s)	(mm)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
2,3	60	0,24 ± 0,05	0,75 ± 0,06
	90	0,29 ± 0,05	0,75 ± 0,09
	120	0,19 ± 0,05	0,94 ± 0,09
	150	0,20 ± 0,06	1,3 ± 0,1
	180	0,26 ± 0,05	1,1 ± 0,1
3,7	60	0,36 ± 0,06	1,41 ± 0,06
	90	0,39 ± 0,06	1,9 ± 0,1
	120	0,21 ± 0,05	2,1 ± 0,1
	150	0,30 ± 0,07	2,1 ± 0,1
	180	0,27 ± 0,05	2,4 ± 0,1
5,2	60	0,51 ± 0,06	2,02 ± 0,07
	90	0,51 ± 0,06	2,4 ± 0,1
	120	0,28 ± 0,05	2,8 ± 0,1
	150	0,23 ± 0,08	3,0 ± 0,2
	180	0,36 ± 0,05	3,4 ± 0,2
6,6	60	0,66 ± 0,07	2,47 ± 0,07
	90	0,57 ± 0,07	2,9 ± 0,2
	120	0,34 ± 0,05	3,3 ± 0,2
	150	0,28 ± 0,08	3,4 ± 0,2
	180	0,45 ± 0,05	3,9 ± 0,2
8,0	60	0,72 ± 0,07	2,87 ± 0,08
	90	0,63 ± 0,07	3,0 ± 0,2
	120	0,59 ± 0,08	3,6 ± 0,3
	150	0,49 ± 0,09	3,7 ± 0,3
	180	0,53 ± 0,05	4,3 ± 0,2

⁽¹⁾, ⁽²⁾ - valores representados graficamente nas figuras 5.4 e 5.10, respectivamente

Tabela B.1.20 - Valores de $(kA)_{sl}$, $[(kA)_{global} - (kA)_{sl}]$ e $[(kA)_{global}^d - (kA)_{sl}]$ relativos aos ensaios realizados com água sem aditivos, para $\phi = 0,3 \text{ mm}$

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	$(kA)_{sl} \times 10^6^{(1)}$	$[(kA)_{global} - (kA)_{sl}] \times 10^6^{(2)}$	$[(kA)_{global}^d - (kA)_{sl}] \times 10^6^{(3)}$
(m ³ /s)	(mm)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
5,0	60	0,52 ± 0,05	0,9 ± 0,1	1,0 ± 0,1
	90	0,49 ± 0,05	1,2 ± 0,1	1,0 ± 0,1
	120	0,44 ± 0,05	1,4 ± 0,1	1,3 ± 0,1
	150	0,47 ± 0,06	1,8 ± 0,1	1,5 ± 0,1
	180	0,50 ± 0,05	2,3 ± 0,2	1,5 ± 0,1

⁽¹⁾, ⁽²⁾ e ⁽³⁾ - valores representados graficamente nas figuras 5.5, 5.11 e 5.18, respectivamente

Tabela B.1.20 - CONT.

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	$(kA)_{sl} \times 10^6^{(1)}$	$[(kA)_{global} - (kA)_{sl}] \times 10^6^{(2)}$	$[(kA)_{global}^d - (kA)_{sl}] \times 10^6^{(3)}$
(m ³ /s)	(mm)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
10	60	0,73 ± 0,06	2,3 ± 0,2	2,4 ± 0,2
	90	0,74 ± 0,06	2,9 ± 0,2	2,3 ± 0,2
	120	0,79 ± 0,05	3,1 ± 0,2	3,0 ± 0,2
	150	0,84 ± 0,06	3,6 ± 0,2	3,1 ± 0,2
	180	0,82 ± 0,05	4,2 ± 0,2	3,7 ± 0,2
15	60	0,95 ± 0,06	3,0 ± 0,2	2,8 ± 0,2
	90	0,97 ± 0,06	3,6 ± 0,2	3,2 ± 0,2
	120	0,94 ± 0,06	4,1 ± 0,2	3,7 ± 0,2
	150	1,00 ± 0,06	4,8 ± 0,2	4,3 ± 0,2
	180	1,03 ± 0,05	5,7 ± 0,3	4,8 ± 0,2
20	60	1,11 ± 0,06	3,6 ± 0,2	3,7 ± 0,2
	90	1,10 ± 0,06	4,4 ± 0,2	4,1 ± 0,2
	120	1,12 ± 0,06	5,5 ± 0,3	4,7 ± 0,2
	150	1,11 ± 0,05	6,1 ± 0,3	5,5 ± 0,2
	180	1,16 ± 0,05	7,5 ± 0,3	6,5 ± 0,2

⁽¹⁾, ⁽²⁾ e ⁽³⁾ - valores representados graficamente nas figuras 5.5, 5.11 e 5.18, respectivamente

Tabela B.1.21 - Valores de $(kA)_{sl}$, $[(kA)_{global} - (kA)_{sl}]$ e $[(kA)_{global}^d - (kA)_{sl}]$ relativos aos ensaios realizados com água sem aditivos, para $\phi = 3,0$ mm

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	$(kA)_{sl} \times 10^6^{(1)}$	$[(kA)_{global} - (kA)_{sl}] \times 10^6^{(2)}$	$[(kA)_{global}^d - (kA)_{sl}] \times 10^6^{(3)}$
(m ³ /s)	(mm)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
20	60	1,43 ± 0,03	2,26 ± 0,05	1,0 ± 0,1
	90	1,41 ± 0,09	2,4 ± 0,2	1,2 ± 0,1
	120	1,83 ± 0,03	2,98 ± 0,07	1,1 ± 0,1
	150	1,51 ± 0,03	3,7 ± 0,3	1,7 ± 0,1
	180	1,65 ± 0,03	4,60 ± 0,08	1,3 ± 0,1
30	60	1,88 ± 0,04	3,25 ± 0,07	1,9 ± 0,1
	90	1,9 ± 0,1	3,5 ± 0,3	2,1 ± 0,2
	120	2,31 ± 0,04	4,31 ± 0,09	2,0 ± 0,1
	150	1,86 ± 0,03	5,1 ± 0,4	2,7 ± 0,1
	180	2,10 ± 0,04	6,1 ± 0,1	2,6 ± 0,1
40	60	2,27 ± 0,04	4,24 ± 0,09	2,7 ± 0,1
	90	2,2 ± 0,1	5,0 ± 0,4	2,9 ± 0,2
	120	2,72 ± 0,05	5,9 ± 0,1	2,9 ± 0,2
	150	2,10 ± 0,04	6,7 ± 0,5	3,5 ± 0,1
	180	2,37 ± 0,04	7,7 ± 0,1	3,6 ± 0,2

⁽¹⁾, ⁽²⁾ e ⁽³⁾ - valores representados graficamente nas figuras 5.6, 5.12 e 5.19, respectivamente

Tabela B.1.21 - CONT.

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	$(kA)_{sl} \times 10^6^{(1)}$	$[(kA)_{global} - (kA)_{sl}] \times 10^6^{(2)}$	$[(kA)_{global}^d - (kA)_{sl}] \times 10^6^{(3)}$
(m ³ /s)	(mm)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
48	60	2,63 ± 0,05	5,0 ± 0,1	3,3 ± 0,2
	90	2,6 ± 0,1	6,4 ± 0,6	3,7 ± 0,2
	120	2,98 ± 0,05	7,1 ± 0,1	3,6 ± 0,2
	150	2,40 ± 0,04	8,2 ± 0,7	4,4 ± 0,2
	180	2,58 ± 0,04	9,5 ± 0,2	4,6 ± 0,2

⁽¹⁾, ⁽²⁾ e ⁽³⁾ - valores representados graficamente nas figuras 5.6, 5.12 e 5.19, respectivamente

Tabela B.1.22 - Valores de $(kA)_{sl}$, $[(kA)_{global} - (kA)_{sl}]$ e $[(kA)_{global}^d - (kA)_{sl}]$ relativos aos ensaios realizados utilizando água com Fumexol 0,02% v/v, para $\phi = 0,2$ mm

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	$(kA)_{sl} \times 10^6^{(1)}$	$[(kA)_{global} - (kA)_{sl}] \times 10^6^{(2)}$
(m ³ /s)	(mm)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
2,3	60	0,18 ± 0,05	0,48 ± 0,09
	90	0,27 ± 0,05	0,39 ± 0,09
	120	0,30 ± 0,05	0,48 ± 0,09
	150	0,35 ± 0,05	0,44 ± 0,09
	180	0,34 ± 0,06	0,53 ± 0,09
3,7	60	0,34 ± 0,05	0,59 ± 0,09
	90	0,34 ± 0,05	0,57 ± 0,09
	120	0,44 ± 0,05	0,52 ± 0,09
	150	0,45 ± 0,05	0,66 ± 0,09
	180	0,47 ± 0,06	0,69 ± 0,09
5,2	60	0,33 ± 0,05	0,84 ± 0,09
	90	0,44 ± 0,05	0,70 ± 0,09
	120	0,46 ± 0,05	0,75 ± 0,09
	150	0,47 ± 0,05	0,84 ± 0,09
	180	0,50 ± 0,06	0,9 ± 0,1
6,6	60	0,31 ± 0,05	0,98 ± 0,09
	90	0,46 ± 0,05	0,90 ± 0,09
	120	0,54 ± 0,05	1,0 ± 0,1
	150	0,48 ± 0,05	1,1 ± 0,1
	180	0,47 ± 0,05	1,2 ± 0,1
8,0	60	0,40 ± 0,05	1,15 ± 0,09
	90	0,44 ± 0,05	1,2 ± 0,1
	120	0,49 ± 0,05	1,3 ± 0,1
	150	0,51 ± 0,05	1,4 ± 0,1
	180	0,53 ± 0,05	1,6 ± 0,1

⁽¹⁾, ⁽²⁾ - valores representados graficamente nas figuras 5.7 e 5.13, respectivamente

Tabela B.1.23 - Valores de $(kA)_{sl}$, $[(kA)_{global} - (kA)_{sl}]$ e $[(kA)_{global}^d - (kA)_{sl}]$ relativos aos ensaios realizados utilizando água com Fumexol 0,02% v/v, para $\phi = 0,3 \text{ mm}$

$\dot{V}_g \times 10^6$ (m ³ /s)	h (mm)	$(kA)_{sl} \times 10^6$ ⁽¹⁾ (m ³ /s)	$[(kA)_{global} - (kA)_{sl}] \times 10^6$ ⁽²⁾ (m ³ /s)	$[(kA)_{global}^d - (kA)_{sl}] \times 10^6$ ⁽³⁾ (m ³ /s)
5,0	60	0,34 ± 0,05	0,6 ± 0,1	0,1 ± 0,1 *
	90	0,36 ± 0,05	0,5 ± 0,1	0,1 ± 0,1 *
	120	0,50 ± 0,05	0,48 ± 0,09	0,4 ± 0,1 *
	150	0,51 ± 0,05	0,7 ± 0,1	0,7 ± 0,1 *
	180	0,43 ± 0,05	1,1 ± 0,1	0,7 ± 0,1 *
10	60	0,48 ± 0,05	1,0 ± 0,1	0,4 ± 0,1 *
	90	0,51 ± 0,05	1,0 ± 0,1	0,5 ± 0,1 *
	120	0,62 ± 0,05	1,4 ± 0,1	0,7 ± 0,1 *
	150	0,68 ± 0,05	1,6 ± 0,1	1,3 ± 0,1 *
	180	0,61 ± 0,05	1,9 ± 0,1	1,3 ± 0,1 *
15	60	0,56 ± 0,05	1,6 ± 0,1	0,9 ± 0,1
	90	0,62 ± 0,05	1,9 ± 0,1	1,1 ± 0,1
	120	0,78 ± 0,06	2,0 ± 0,1	1,5 ± 0,2
	150	0,80 ± 0,06	2,5 ± 0,2	1,9 ± 0,2
	180	0,77 ± 0,06	2,9 ± 0,2	2,3 ± 0,2
20	60	0,59 ± 0,05	2,3 ± 0,2	1,4 ± 0,1
	90	0,61 ± 0,06	2,8 ± 0,2	1,9 ± 0,2
	120	0,79 ± 0,06	3,0 ± 0,1	2,1 ± 0,2
	150	0,87 ± 0,06	3,7 ± 0,2	2,9 ± 0,2
	180	0,96 ± 0,06	4,0 ± 0,2	3,4 ± 0,2

⁽¹⁾, ⁽²⁾ e ⁽³⁾ - valores representados graficamente nas figuras 5.8, 5.14 e 5.20, respectivamente

* - estes valores não foram considerados no tratamento posterior dos resultados

Tabela B.1.24 - Valores de $(kA)_{sl}$, $[(kA)_{global} - (kA)_{sl}]$ e $[(kA)_{global}^d - (kA)_{sl}]$ relativos aos ensaios realizados utilizando água com Fumexol 0,02% v/v, para $\phi = 3,0 \text{ mm}$

$\dot{V}_g \times 10^6$ (m ³ /s)	h (mm)	$(kA)_{sl} \times 10^6$ ⁽¹⁾ (m ³ /s)	$[(kA)_{global} - (kA)_{sl}] \times 10^6$ ⁽²⁾ (m ³ /s)	$[(kA)_{global}^d - (kA)_{sl}] \times 10^6$ ⁽³⁾ (m ³ /s)
20	60	1,13 ± 0,03	1,87 ± 0,05	0,7 ± 0,1
	90	1,15 ± 0,08	1,9 ± 0,2	1,0 ± 0,1
	120	1,43 ± 0,03	1,86 ± 0,06	1,3 ± 0,1
	150	1,33 ± 0,03	2,01 ± 0,05	1,5 ± 0,1
	180	1,46 ± 0,03	2,50 ± 0,06	1,9 ± 0,1
30	60	1,45 ± 0,03	2,66 ± 0,07	1,1 ± 0,1
	90	1,46 ± 0,09	2,7 ± 0,3	1,6 ± 0,2
	120	1,81 ± 0,04	2,71 ± 0,07	1,8 ± 0,1
	150	1,59 ± 0,03	3,12 ± 0,05	2,3 ± 0,1
	180	1,77 ± 0,03	3,66 ± 0,07	2,7 ± 0,1

⁽¹⁾, ⁽²⁾ e ⁽³⁾ - valores representados graficamente nas figuras 5.9, 5.15 e 5.21, respectivamente

Tabela B.1.24 - CONT.

$\dot{V}_g \times 10^6$	h	$(kA)_{sl} \times 10^6^{(1)}$	$[(kA)_{global} - (kA)_{sl}] \times 10^6^{(2)}$	$[(kA)_{global}^d - (kA)_{sl}] \times 10^6^{(3)}$
(m ³ /s)	(mm)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
40	60	1,80 ± 0,04	3,21 ± 0,08	1,6 ± 0,1
	90	1,8 ± 0,1	3,4 ± 0,3	2,1 ± 0,2
	120	2,31 ± 0,05	3,8 ± 0,1	2,6 ± 0,2
	150	1,84 ± 0,04	4,43 ± 0,07	3,1 ± 0,2
	180	1,99 ± 0,04	4,91 ± 0,09	3,6 ± 0,2
48	60	2,14 ± 0,04	3,48 ± 0,09	2,2 ± 0,1
	90	2,1 ± 0,1	4,1 ± 0,4	2,6 ± 0,2
	120	2,72 ± 0,05	4,6 ± 0,1	3,0 ± 0,2
	150	2,06 ± 0,04	5,24 ± 0,08	3,7 ± 0,2
	180	2,24 ± 0,04	5,8 ± 0,1	4,4 ± 0,2

⁽¹⁾, ⁽²⁾ e ⁽³⁾ - valores representados graficamente nas figuras 5.9, 5.15 e 5.21, respectivamente

C.1 DEFINIÇÃO DA ÁREA SUPERFICIAL, VOLUME E DIÂMETRO EQUIVALENTE DE BOLHAS ELIPSOIDAIS E CALOTES ESFÉRICAS

A área superficial, A_b , de uma bolha com a forma de um esferóide achatado, obtido por rotação de uma elipse em torno do seu eixo menor, como o representado na figura C.1.1,

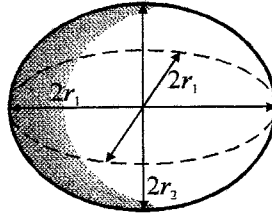


Figura C.1.1 - Esferóide achatado

é definida (Perry e Chilton, 1973) como

$$A_b = 2\pi r_1^2 + \pi r_1 r_2 \ln \frac{r_1 + r_2}{r_1 - r_2} \quad (\text{C.1.1})$$

Para estas bolhas, o volume é dado por

$$V_b = \frac{4}{3} \pi r_1^2 r_2 \quad (\text{C.1.2})$$

Se a bolha tiver a forma de um esferóide alongado, como o representado na figura C.1.2, e que é obtido por rotação de uma elipse em torno do seu eixo maior, então a área superficial define-se como

$$A_b = 2\pi r_2^2 + 2\pi r_1^2 \operatorname{sen}^{-1}\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (\text{C.1.3})$$

sendo o respectivo volume

$$V_b = \frac{4}{3}\pi r_1 r_2^2 \quad (\text{C.1.4})$$

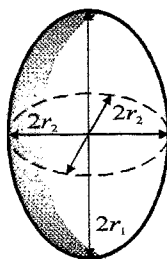


Figura C.1.2 - Esferóide alongado

Para calotes esféricas, de “altura” r_1 e raio da base r_2 , a área superficial é dada por

$$A_b = \pi(r_1^2 + r_2^2) \quad (\text{C.1.5})$$

e o volume por

$$V_b = \frac{\pi}{6}r_1(3r_2^2 + r_1^2) \quad (\text{C.1.6})$$

Para qualquer bolha é ainda possível definir diâmetro equivalente, d_e , como o diâmetro de uma esfera com igual volume, ou seja,

$$d_e = \left(\frac{6V_b}{\pi}\right)^{1/3} \quad (\text{C.1.7})$$

C.2 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

C.2.1 Difusividade e solubilidade do oxigénio e do azoto em água

	$D \times 10^9$ (m ² /s)		$H \times 10^5$ ⁽³⁾ mol/(Nm)	
	20°C ⁽¹⁾	25°C ⁽²⁾	20°C	25°C
O ₂	2,3	2,5	1,37	1,25
N ₂	1,7	1,9	0,706	0,658

⁽¹⁾ - valores estimados a partir dos valores de D a 25°C, utilizando a relação $D\mu/T = \text{const.}$ (Sherwood *et al.*, 1975)

⁽²⁾ - Perry e Chilton, 1973

⁽³⁾ - International Critical Tables, vol. 3, 1928; lei de Henry expressa sob a forma: $C = Hp$, com C (concentração de soluto dissolvido no líquido) em mol/m³ e p (pressão parcial de soluto no gás) em N/m²

C.2.2 Tensão superficial da água em contacto com ar (International Critical Tables, vol. 4, 1928)

T (°C)	$\sigma \times 10^3$ (N/m)
20	72,75
22	72,44
25	71,97

C.2.3 Características do agente anti-espuma

Polisiloxano, não iónico, com designação comercial de Fumexol SD (produzido pela Ciba-Geigy)

Tensão superficial de solução aquosa (0,02% v/v)/ar, a 25°C: 41×10^{-3} N/m

NOMENCLATURA

A	parâmetro de ajuste (secção 4.6.2)
A	área interfacial de transferência gás-líquido
A_b	área superficial da bolha
A_f	área superficial da bolha, em formação, no momento de desprendimento do orifício
A_s	área interfacial relativa às bolhas em subida na coluna de líquido
a_{es}^*	área interfacial equivalente por unidade de altura de líquido, na coluna de borbulhamento com o orifício
a_s^*	área interfacial por unidade de altura de líquido, na coluna de borbulhamento com o orifício
b	parâmetro de ajuste (secção 4.6.2)
b	distância do centro da bolha, em formação, à superfície plana em que se localiza o orifício (Apêndice A.3)
C	concentração média de oxigénio dissolvido no líquido, à saída da coluna de borbulhamento com o orifício;
	concentração de soluto dissolvido no líquido, à distância r do centro da bolha (secções 3.4, 4.4)
C^*	concentração do soluto que, no líquido, estaria em equilíbrio com a respectiva pressão parcial, p , no gás
C_0	concentração média de soluto dissolvido no líquido, longe da bolha (secção 3.4.2); concentração inicial de oxigénio dissolvido na água (Apêndice A.4)
C_{base}^*	concentração de soluto que, no líquido, estaria em equilíbrio com a respectiva pressão parcial, p , no gás, na base da coluna de líquido (Apêndice A.2)
C_e	concentração média de oxigénio dissolvido no líquido, à entrada da coluna de borbulhamento com o orifício
$(C_e)_{N_2}$	concentração média de azoto dissolvido no líquido, à entrada da coluna de borbulhamento com o orifício (Apêndice A.5)
C_g	concentração de soluto no seio do gás (Apêndice A.1)

C_g^i	concentração de soluto na interface, do lado do gás (Apêndice A.1)
C_g^*	concentração de soluto que, no gás, estaria em equilíbrio com a concentração de soluto no seio do líquido, C_L (Apêndice A.1)
C_i	concentração média do soluto i dissolvido no líquido (secções 3.4, 4.4); concentração média do soluto i dissolvido no líquido, à saída da coluna de borbulhamento com o orifício
C_i^*	concentração do soluto i que, no líquido, estaria em equilíbrio com a respectiva pressão parcial, p_i , no gás
C_{in}	concentração inicial de oxigénio nas microbolhas de ar (secção 4.2.2)
C_L	concentração de soluto no seio do líquido (Apêndice A.1)
C_L^i	concentração de soluto no líquido, na interface (Apêndice A.1)
C_L^*	concentração de soluto que, no líquido, estaria em equilíbrio com a concentração no seio do gás, C_g
$C_{N_2}^{**}$	concentração de azoto que, no líquido, estaria em equilíbrio com azoto puro (Apêndice A.5)
C_{topo}^*	concentração de soluto que, no líquido, estaria em equilíbrio com a respectiva pressão parcial, p , no gás, no topo da coluna de líquido (Apêndice A.2)
c_D	coeficiente de arrasto (Apêndice A.3)
D	difusividade do soluto no líquido
D_c	diâmetro interno da coluna de borbulhamento
D_i	difusividade do soluto i , no líquido
d	diâmetro da bolha (esférica)
$\bar{d}$	diâmetro médio da microbolha durante o intervalo de tempo Δt
d_0	diâmetro inicial da microbolha
d_1	diâmetro da microbolha antes da expansão (secção 3.4.4)
d_2	diâmetro da microbolha depois da expansão (secção 3.4.4)
d_e	diâmetro equivalente da bolha
d_f	diâmetro da bolha no momento do desprendimento do orifício (Capítulo 2) diâmetro final da microbolha (Capítulos 3, 4)
d_I	diâmetro da microbolha calculado na iteração I (secções 3.4.3, 4.4)
Δd_0	variação inicial do diâmetro da microbolha, no processo de dissolução, ocorrida no intervalo de tempo Δt_0 (secção 3.4.3)

E	coeficiente de excentricidade de um elipsóide (diâmetro vertical / diâmetro horizontal)
e	função do coeficiente de excentricidade, E , de um elipsóide: $e = (1 - E^2)^{1/2}$
F_B	força de impulsão
F_D	força de arrasto
F_I	força de inércia
F_M	quantidade de movimento
F_T	força de tensão superficial
f_{O_2}	razão entre o oxigénio transferido de uma microbolha para o líquido e a quantidade inicial de oxigénio existente na bolha
f'_{O_2}	razão entre o oxigénio transferido do líquido para uma microbolha, com um determinado diâmetro inicial, e o oxigénio existente numa microbolha de ar, com esse tamanho
g	aceleração da gravidade
H	constante de proporcionalidade da lei de Henry
H_i	constante de proporcionalidade da lei de Henry, para o soluto i
h	altura de líquido na coluna de borbulhamento com o orifício
K	factor correctivo (equação (A.3.17), Apêndice A.3)
K_L	coeficiente global de transferência de massa, do lado do líquido (Apêndice A.1)
k_w	coeficiente individual de transferência de massa, do lado do líquido
k_G	coeficiente individual de transferência de massa, do lado do gás
k_L	coeficiente individual de transferência de massa, do lado do líquido
k_s	coeficiente de transferência de massa relativo às bolhas em subida no líquido
(kA)	produto do coeficiente global de transferência de massa, pela área interfacial, excluída a superfície livre (Apêndice A.2)
	produto do coeficiente global de transferência de massa, pela área interfacial total (Apêndice A.4)
$(kA)_f$	produto do coeficiente de transferência de massa relativo às bolhas em formação, pela correspondente área interfacial
$(kA)_f^v$	valor teórico (“verdadeiro”) de $(kA)_f$ (secção 4.2.2)
$(kA)_f^{ap}$	valor experimental (“aparente”) de $(kA)_f$ (secção 4.2.2)
$(kA)_{global}$	produto do coeficiente global de transferência de massa pela área interfacial total de contacto, na coluna de borbulhamento com o orifício

$(kA)^d$	produto do coeficiente global de transferência de massa, pela área interfacial, excluída a superfície livre, em desabsorção (Apêndice A.2)
$(kA)_{\text{global}}^d$	produto do coeficiente global de transferência de massa, pela área interfacial total de contacto na coluna de borbulhamento com o orifício, em desabsorção
$(kA)_{\text{global}}^{(2)}$	produto do coeficiente global de transferência de massa, pela área interfacial total de contacto, na coluna 2
$(kA)_{\text{mb}}$	coeficiente de transferência de massa “fictício” (incluída a área interfacial) associado às microbolhas, em absorção (equação (2.3.b), Capítulo 5)
$(kA)_{\text{mb}}^d$	coeficiente de transferência de massa “fictício” (incluída a área interfacial) associado às microbolhas, em desabsorção (equação (2.5.b), Capítulo 5)
$(kA)_r$	produto do coeficiente de transferência de massa, relativo às bolhas retidas junto à superfície livre do líquido, pela correspondente área interfacial
$(kA)_s$	produto do coeficiente de transferência de massa, relativo às bolhas em subida no líquido, pela correspondente área interfacial
$(kA)_{\text{sl}}$	produto do coeficiente de transferência de massa, relativo à superfície livre do líquido, pela correspondente área interfacial
$(ka^*)_s$	produto do coeficiente de transferência de massa, relativo às bolhas em subida no líquido, pela área interfacial correspondente, por unidade de altura de líquido no borbulhador
L'	dimensão característica de um esferóide (área superficial da bolha / perímetro máximo projectado num plano normal ao fluxo)
M	número de componentes da fase gasosa (> 2)
M^w	massa de líquido deslocado pela bolha em formação (Apêndice A.3)
M_b	massa da bolha em formação (Apêndice A.3)
m	número de variáveis dependentes (Apêndice B.1)
m_v	massa virtual de uma bolha em formação num líquido
N	frequência de formação de microbolhas
N_b	número total de bolhas em ascensão, na coluna de líquido de altura h
n	número total de moles na bolha; número de moles de oxigénio na bolha (Apêndice A.2)
$n(I)$	número total de moles na bolha, na iteração I (secção 4.4)
n_i	número de moles de soluto i , transferido entre a microbolha e o líquido
$n_i(I)$	número de moles de soluto I , transferido entre a microbolha e o líquido, durante o intervalo de tempo calculado entre a iteração (I-1) e a iteração I
$\dot{n}$	taxa molar de transferência de soluto entre gás e líquido

$\dot{n}_I$	taxa molar de transferência de soluto entre as bolhas em formação e o líquido
$\dot{n}_{II}$	taxa molar de transferência de soluto entre as bolhas em subida e o líquido
$\dot{n}_{III}$	taxa molar de transferência de soluto entre as bolhas retidas junto à superfície livre e o líquido
$\dot{n}_{IV}$	taxa molar de transferência de soluto através da superfície livre do líquido
$\dot{n}_{mb}$	taxa molar de transferência de soluto entre as microbolhas de gás e o líquido, em absorção
$\dot{n}_{mb}^d$	taxa molar de transferência de soluto entre as microbolhas de gás e o líquido, em desabsorção
P	pressão total no interior da bolha
P_e	pressão exterior à bolha; pressão absoluta
P_{e1}	pressão exterior à bolha antes da expansão (secção 3.4.4)
P_{e2}	pressão exterior à bolha depois da expansão (secção 3.4.4)
p	pressão parcial de um dado soluto no gás; pressão parcial de oxigénio, na bolha (Apêndice A.2)
p_i	pressão parcial do soluto i , na bolha
p_v	pressão de vapor da água (Apêndice B.1)
Pe	número de Peclet, $d_e v_b / D$
$\mathcal{R}$	constante da equação de estado dos gases perfeitos
r	coordenada esférica (equação (3.1))
r_1	metade do maior diâmetro de uma bolha elipsoidal (Apêndice C.1, equações (C.1.1) a (C.1.4)); altura de uma calote esférica (Apêndice C.1, equações (C.1.5) e (C.1.6))
r_2	metade do menor diâmetro de uma bolha elipsoidal (Apêndice C.1, equações (C.1.1) a (C.1.4)); raio da base de uma calote esférica (Apêndice C.1, equações (C.1.5) e (C.1.6))
Re	número de Reynolds, $\rho v_b d_e / \mu$; número de Reynolds, $\rho v_B d / \mu$, $\rho v_R d / \mu$ (Apêndice A.3)
Re'	número de Reynolds, $\rho v_b L' / \mu$, definido com base na dimensão L'
Sc	número de Schmidt, $\mu / (\rho D)$
Sh	número de Sherwood, kd_e / D
Sh'	número de Sherwood, kL' / D , definido com base na dimensão L'

T	temperatura
T_1	temperatura da água, na coluna de borbulhamento com o orifício
t	tempo
t_1, t_2	tempo de dissolução ou crescimento de uma microbolha (Epstein e Plesset, índice 1, algoritmo apresentado neste trabalho, índice 2)
t_c	tempo de dissolução total de uma microbolha; tempo total de contacto entre a bolha e o líquido (Apêndice A.2)
t_f	tempo de formação de uma bolha no orifício
t_r	tempo de residência de uma microbolha no líquido
t_s	tempo de subida de uma coluna de líquido, de uma microbolha à velocidade terminal
Δt	intervalo de tempo associado a uma variação finita do diâmetro da bolha, entre dois valores muito próximos
Δt_0	intervalo de tempo inicial, no processo de dissolução de uma microbolha, em que ocorre uma variação muito pequena, Δd_0 , do diâmetro (secção 3.4.3)
u_o	velocidade do gás no orifício de borbulhamento
u_t	velocidade terminal de subida da bolha na coluna de líquido
V	volume de água na coluna de borbulhamento (Apêndice A.4)
V_0	volume inicial da microbolha (secção 4.6.2)
V_b	volume da bolha
$\dot{V}_g$	caudal de gás na coluna de borbulhamento com o orifício
$\dot{V}_{g1}$	caudal de borbulhamento de gás, na coluna 1 da figura 2.7 (secção 2.2.3)
$\dot{V}_{g2}$	caudal de borbulhamento de gás, na coluna 2 da figura 2.7 (secção 2.2.3)
$\dot{V}_{mb}$	caudal de gás disperso no líquido sob a forma de microbolhas
v_B	velocidade da base da bolha, durante a sua formação (Apêndice A.3)
v_b	velocidade de subida de uma bolha numa coluna de líquido
v_e	velocidade de expansão da bolha, durante a sua formação, num orifício (Apêndice A.3)
$\dot{v}_L$	caudal de circulação de líquido entre as duas colunas utilizadas nos ensaios experimentais tipo A, B e C
v_R	velocidade relativa do topo da bolha durante a sua formação (Apêndice A.3)
v_r	velocidade radial do líquido adjacente à bolha
w_{x_j}	incerteza associada à medição da variável x_j

w_y	incerteza mais provável, associada à variável y
We	número de Weber para o gás, no orifício, $\rho_g u_o^2 \phi / \sigma$
x	fracção molar de soluto, no líquido; massa de oxigénio transferida entre uma microbolha e o líquido (secção 5.4)
x_j	variável independente (Apêndice B.1)
y	variável dependente (Apêndice B.1)
y_i	fracção molar do componente i , no gás
$y_i(I)$	fracção molar do componente i , na microbolha, na iteração I

Símbolos gregos

α	fracção do caudal de borbulhamento dispersa no líquido sob a forma de microbolhas
β	razão entre a concentração de soluto dissolvido no líquido e a correspondente concentração de equilíbrio com o gás
ϕ	diâmetro do orifício de borbulhamento
μ	viscosidade do líquido
ρ	massa volúmica do líquido
ρ_g	massa volúmica do gás
$\Delta\rho$	diferença entre as massas volúmicas do líquido e do gás
σ	tensão superficial

REFERÊNCIAS

1. Alvarez-Cuenca, M., Baker, C. G. J. e Bergougnou, M.A. 1980. Oxygen mass transfer in bubble columns. *Chemical Engineering Science* **35**, 1121-1127
2. Baird, M. H. I. e Davidson, J. F. 1962. Gas absorption by large rising bubbles. *Chemical Engineering Science* **17**, 87-93
3. Braulick, W. J., Fair, J. R. e Lerner, B. J. 1965. Mass Transfer in a Sparged Contactor. *A.I.Ch.E. Journal* **11**, 1, 73-79
4. Cable, M. e Frade, J. R. 1987. Numerical Solutions for diffusion-controlled growth of spheres from finite initial size. *Journal of Materials Science* **22**, 149-154
5. Cable, M. e Frade, J. R. 1987. Diffusion-controlled growth of multi-component gas bubbles. *Journal of Materials Science* **22**, 919-924
6. Cable, M. e Frade, J. R. 1987. The diffusion-controlled dissolution of spheres. *Journal of Materials Science* **22**, 1894-1900
7. Calderbank, P. H. e Lochiel, A. C. 1964. Mass transfer coefficients, velocities and shapes of carbon dioxide bubbles in free rise through distilled water. *Chemical Engineering Science* **19**, 485-503
8. Calderbank, P. H. e Patra, R. P. 1966. Mass transfer in the liquid phase during the formation of bubbles. *Chemical Engineering Science* **21**, 721-723
9. Churchill, S. W. 1988. *Viscous flows - The Practical Use of Theory*. Butterworths

10. Clift, R., Grace, J. R. e Weber, M. E. 1978. *Bubbles, Drops and Particles*. Academic Press
11. Davidson, J. F. e Schüler, B. O. G. 1960. Bubble formation at an orifice in a viscous liquid. *Trans. Instn. Chem. Engrs.* **38**, 144-154
12. Davidson, J. F. e Schüler, B. O. G. 1960. Bubble formation at an orifice in a inviscid liquid. *Trans. Instn. Chem. Engrs.* **38**, 335-342
13. Davies, J. T. e Rideal, E. K. 1963. *Interfacial Phenomena*. 2ª edição. Academic Press
14. Deckwer, W.-D., Burkhart, R. e Zoll, G. 1974. Mixing and mass transfer in tall bubble columns. *Chemical Engineering Science* **29**, 2177-2188
15. Deckwer, W.-D., Hallensleben, J. e Popovic, M. 1980. Exclusion of gas sparger influence on mass transfer in bubble columns. *The Canadian Journal of Chem. Engng.* **58**, 190-197
16. Deckwer, W.-D., Nguyen-Tien, K., Kelkar, B.G. e Shah, Y. T. 1983. Applicability of axial dispersion model to analyse mass transfer measurements in bubble columns. *A.I.Ch.E. Journal* **29**, 6, 915-922
17. Deckwer, W.-D. e Schumpe, A. 1987. Bubble columns - the state of the art and current trends. *International Chemical Engineering* **27**, 3, 405-422
18. Duda, J. L. e Vrentas, J. S. 1969. Mathematical analysis of bubble dissolution. *A.I.Ch.E. Journal* **15**, 3, 351-356
19. Duda, J. L. e Vrentas, J. S. 1971. Heat or mass transfer-controlled dissolution of an isolated sphere. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **14**, 395-408

20. Epstein, P. S. e Plesset, M. S. 1950. On the stability of gas bubbles in liquid-gas solutions. *The Journal of Chemical Physics* **18**, 11, 1505-1509
21. Gaddis, E. S. e Vogelphol, A. 1986. Bubble Formation in Quiescent Liquids under Constant Flow Conditions. *Chemical Engineering Science* **41**, 1, 97-105
22. Griffith, R. M. 1960. Mass transfer from drops and bubbles. *Chemical Engineering Science* **12**, 198-213
23. Guedes de Carvalho, J. R. F., Rocha, F. A. N., Vasconcelos, M. I., Silva, M. C. M. e Oliveira, F. A. R. 1986. Mass transfer during bubbling in single and multi-orifice absorbers. *Chemical Engineering Science* **41**, 8, 1987-1994
24. Heijnen, J. J., Van't Riet, K. e Wolthuis, A. J. 1980. Influence of very small bubbles on the dynamic $k_L A$ measurements in viscous gas-liquid systems. *Biotechnology and Bioengineering* **22**, 1945-1956
25. Higbie, R. 1935. The rate of absorption of a pure gas into a still liquid during short periods of exposure. *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.* **31**, 365-389
26. Holman, J. P. 1994. *Experimental Methods for Engineers*. 6ª edição. McGrawHill
27. Hong, W.-H. e Brauer, H. 1989. Gas-liquid mass transfer in bubble columns reactors. *International Chemical Engineering* **29**, 3, 388-434
28. Hwang, H. J. e Stenstrom, M. K. 1985. Evaluation of fine-bubble alpha factors in near full-scale equipment. *Journal of Water Pollution Control Federation* **57**, 12, 1142-1151
29. *International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology* 1928. vols. 3 e 4, 1ª edição. McGraw-Hill Book Company

30. Klug, P. e Vogelpohl, A. 1986. Bubble formation at sieve plates - Effects on gas hold-up in bubble columns. *German Chemical Engineering* **9**, 93-101
31. Leighton, T. G. 1994. *The Acoustic Bubble*. Academic Press Limited
32. Levich, V. G. 1962. *Physicochemical Hydrodynamics*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
33. Llorens, J., Mans, C. e Costa, J. 1988. Discrimination of the effects of surfactants in gas absorption. *Chemical Engineering Science* **43**, 3, 443-450
34. McCabe, W. L., Smith, J. C. e Harriot, P. 1993. *Unit Operations of Chemical Engineering*. 5ª edição. McGraw-Hill
35. MacIntyre, F. 1972. Flow pattern in breaking bubbles. *Journal of Geophysical Research* **77**, 27, 5211-5228
36. Merlivat, L. e Memery, L. 1983. Gas Exchange Across an Air-Water Interface: Experimental Results and Modeling of Bubble Contribution to Transfer. *Journal of Geophysical Research* **88**, C1, 707-724
37. Mersmann, A. 1963. Wann werden alle Löcher einer Siebboden-Lochplatte durchströmt?. *Chemie-Ing.-Tech.* **35**, 2, 103-107
38. Miyahara, T., Terakado, H. e Takahashi, T. 1983. Transition from bubbling to jetting at single orifices. *Journal of Chemical Engineering of Japan* **16**, 6, 454-458
39. Miyahara, T., Haga, N. e Takahashi, T. 1983. Bubble formation from an orifice at high gas flow rates. *International Chemical Engineering* **23**, 3, 524-531

40. Motarjemi, M. e Jameson, G. J. 1978. Mass transfer from very small bubbles - the optimum size for aeration. *Chemical Engineering Science* **33**, 1415-1423
41. Muller, F. L. e Davidson, J. F. 1992. On the contribution of small gas bubbles to mass transfer in bubble columns containing highly viscous liquids. *Chemical Engineering Science* **47**, 13/14, 3525-3532
42. Pamperin, O. e Rath, H.-J. 1995. Influence of buoyancy on bubble formation at submerged orifices. *Chemical Engineering Science* **50**, 19, 3009-3024
43. Pandit, A. B., Philip, J., Davidson, J. F. e Dodd, P. W. 1987. The generation of small bubbles in liquids. *ICREC-2*, Pune, India, 72-82
44. Perry, R. H. e Chilton, C. H. 1973. *Chemical Engineers' Handbook*. 5ª edição. McGraw-Hill Kogakusha
45. Philip, J., Proctor, J. M., Niranjana, K. e Davidson, J. F. 1990. Gas hold-up and liquid circulation in internal loop reactors containing highly viscous newtonian and non-newtonian liquids. *Chemical Engineering Science* **45**, 3, 651-664
46. Rübiger, N. e Vogelpohl, A. 1982. Bubble formation in stagnant and flowing newtonian liquids. *German Chemical Engineering* **5**, 314-323
47. Rübiger, N. e Vogelpohl, A. 1983. Calculation of bubble size in the bubble and jet regimes for stagnant and flowing newtonian liquids. *German Chemical Engineering* **6**, 173-182
48. Rocha, F. A. N. 1984. *Absorção em borbulhadores gás-líquido*. Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

49. Rocha, F. A. N. e Guedes de Carvalho, J. R. F. 1984. Absorption during gas injection through a submerged nozzle. Part I: Gas side and liquid side transfer coefficients. *Chemical Engineering Research and Design* **62**, 303-314
50. Rocha, F. A. N. e Guedes de Carvalho, J. R. F. 1987. Absorption during gas injection through a submerged nozzle. Part II: Interfacial areas. *Chemical Engineering Research and Design* **65**, 279-284
51. Ruff, K. 1972. Bildung von Gasblasen an Düsen bei Konstantem Volumendurchsatz. *Chemie-Ing.-Techn.* **44**, 24, 1360-1366
52. Ruff, K. 1974. Grenze zwischen Blasengasen und Strahlgasen bei niedrigviskosen Flüssigkeiten und Konstantem Gasvolumen-Durchsatz. *Chemie-Ing.-Techn.* **46**, 18, 769-771
53. Ruff, K., Pilhofer, T. e Mersmann, A. 1978. Ensuring flow through all the openings of perforated plates for fluid dispersion. *International Chemical Engineering* **18**, 3, 395-401
54. Scheele, G. F., Meister, B. J. 1968. Drop Formation at Low Velocities in Liquid-Liquid Systems: Part I. Prediction of Drop Volume. Part II. Prediction of Jetting Velocity. *A.I.Ch.E. Journal* **14**, 1, 9-19
55. Scriven, L. E. 1959. On the dynamics of phase growth. *Chemical Engineering Science* **10**, 1/2, 1-13
56. Sherwood, T. K., Pigford, R. L. e Wilke, C. R. 1975. *Mass Transfer*. International Student Edition. McGraw-Hill Kogakusha
57. Shulman, H. L. e Molstad, M. C. 1950. Gas-bubble columns for gas-liquid contacting. *Industrial and Engineering Chemistry* **42**, 6, 1058-1070

-
58. *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. 1981. 15ª edição. American Public Health Association
59. Subramanian, R. S. e Weinberg, M. C. 1981. Asymptotic expansions for the description of gas dissolution and growth. *A.I.Ch.E. Journal* **27**, 5, 739-748
60. Treybal, R. E. 1980. *Mass-transfer operations*. 3ª edição. McGraw-Hill
61. Vrentas, J. S., Vrentas, C. M. e Ling, H.-C. 1983. Equations for predicting growth or dissolution rates of spherical particles. *Chemical Engineering Science* **38**, 11, 1927-1934
62. Ward, C. A. e Tucker, A. S. 1975. Thermodynamic theory of diffusion-controlled bubble growth or dissolution and experimental examination of the predictions. *Journal of Applied Physics* **46**, 1, 233-238
63. Ward, C. A., Rizk, M. e Tucker, A. S. 1982. Statistical rate theory of interfacial transport. II. Rate of isothermal bubble evolution in a liquid-gas solution. *J. Chem. Phys.* **76**, 11, 5606-5614
64. Ward, C. A., Tikuisis, P. e Tucker, A. S. 1986. Bubble evolution in solutions with gas concentrations near the saturation value. *Journal of Colloid and Interface Science* **113**, 2, 388-398
65. Weinberg, M. C. 1981. Surface tension effects in gas bubble dissolution and growth. *Chemical Engineering Science* **36**, 137-141
66. Weinberg, M. C. 1986. On the possibility of diffusionally driven oscillations in two component gas bubbles in fluids. *Chemical Engineering Science* **41**, 9, 2333-2340
67. Yoshida, F. e Akita, K. 1965. Performance of gas-bubble columns: volumetric liquid-phase mass transfer coefficient and gas holdup. *A.I.Ch.E. Journal* **11**, 1, 9-12

-
68. Yung, C.-N., De Witt, K. J., Brockwell, J. L., McQuillen, J. B. e Chai, A.-T. 1989. A numerical study of parameters affecting gas bubble dissolution. *Journal of Colloid and Interface Science* **127**, 2, 442-452

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Coluna de borbulhamento com um orifício central	6
Figura 2.2	Identificação de quatro regiões distintas na coluna de borbulhamento	8
Figura 2.3	Aspectos hidrodinâmicos associados às diferentes regiões na coluna de borbulhamento	8
Figura 2.4	Variação da taxa de transferência do soluto no borbulhador, com a altura de líquido	11
Figura 2.5	Absorção de oxigénio numa coluna de borbulhamento (1), em estado estacionário	12
Figura 2.6	Absorção de oxigénio através da superfície livre do líquido na coluna 1	14
Figura 2.7	Esquema da instalação experimental	15
Figura 2.8	Semi-cortes verticais e vista de cima do borbulhador principal	17
Figura 2.9	Ilustração da injeção de gás junto à superfície livre do líquido, na coluna 1	18
Figura 2.10	Célula para suporte do eléctrodo de oxigénio, para medições em linha	19
Figura 2.11	Semi-cortes verticais e vista de cima da célula para suporte do eléctrodo de oxigénio	20
Figura 2.12	Regulação e medida dos caudais de gás	21
Figura 2.13	Borbulhamento de ar em água através de um orifício de 0,2 mm, a um caudal de $2,3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	28
Figura 2.14	Borbulhamento de ar em água com anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v) através de um orifício de 0,2 mm, a um caudal de $2,3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	28
Figura 2.15	Borbulhamento de ar em água através de um orifício de 0,2 mm, a um caudal de $8,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	30
Figura 2.16	Borbulhamento de ar em água com anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v) através de um orifício de 0,2 mm, a um caudal de $8,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	30
Figura 2.17	Borbulhamento de ar em água através de um orifício de 0,3 mm, a um caudal de $5,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	31
Figura 2.18	Borbulhamento de ar em água com anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v) através de um orifício de 0,3 mm, a um caudal de $5,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	31
Figura 2.19	Borbulhamento de ar em água através de um orifício de 0,3 mm, a um caudal de $8,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	32
Figura 2.20	Borbulhamento de ar em água com anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v) através de um orifício de 0,3 mm, a um caudal de $8,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	32
Figura 2.21	Borbulhamento de ar em água através de um orifício de 0,3 mm, a um caudal de $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	33
Figura 2.22	Borbulhamento de ar em água com anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v) através de um orifício de 0,3 mm, a um caudal de $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	33
Figura 2.23	Borbulhamento de ar em água através de um orifício de 3,0 mm, a um caudal de $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	34
Figura 2.24	Borbulhamento de ar em água com anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v) através de um orifício de 3,0 mm, a um caudal de $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	34
Figura 2.25	Borbulhamento de ar em água através de um orifício de 3,0 mm, a um caudal de $50 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	35

Figura 2.26	Borbulhamento de ar em água com anti-espuma (Fumexol 0,02% v/v) através de um orifício de 3,0 mm, a um caudal de $50 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	35
Figura 2.27	Representação de $(kA)_{\text{global}}$ em função de h , para o orifício de 0,2 mm (água sem aditivos)	37
Figura 2.28	Representação de $(kA)_{\text{global}}$ em função de h , para o orifício de 0,3 mm (água sem aditivos)	37
Figura 2.29	Representação de $(kA)_{\text{global}}$ em função de h , para o orifício de 3,0 mm (água sem aditivos)	38
Figura 2.30	Representação de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para o orifício de 0,2 mm (água sem aditivos)	40
Figura 2.31	Representação de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para o orifício de 0,3 mm (água sem aditivos)	40
Figura 2.32	Representação de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para o orifício de 3,0 mm (água sem aditivos)	41
Figura 2.33	Representação de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para o orifício de 0,2 mm (água com Fumexol - 0,02% v/v)	42
Figura 2.34	Representação de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para o orifício de 0,3 mm (água com Fumexol - 0,02% v/v)	43
Figura 2.35	Representação de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para o orifício de 3,0 mm (água com Fumexol - 0,02% v/v)	43
Figura 2.36	Sequência proposta por Rübiger e Vogelpohl (1983) para a formação de bolhas em orifícios	54
Figura 3.1	Instalação utilizada para visualização de microbolhas formadas em condições de borbulhamento intenso	67
Figura 3.2	Borbulhamento de ar em água, através de um orifício de 3,0 mm, à pressão atmosférica	69
Figura 3.3	Aspecto da coluna de borbulhamento representada na figura 3.2, posteriormente à interrupção do borbulhamento, (a) 22 segundos e (b) 28 segundos, após ter sido aplicado vácuo ($60 \times 10^{-3} \text{ bar}$)	69
Figura 3.4	Evolução, com o tempo, do tamanho de uma microbolha de oxigénio, de diâmetro inicial igual a 100 μm , imersa em água saturada em oxigénio (1 bar e 20°C)	76
Figura 3.5	Evolução, com o tempo, do tamanho de microbolhas de ar, de diferentes diâmetros iniciais, em água saturada com ar (1 bar e 20°C)	81
Figura 3.6	Alturas percorridas por microbolhas de ar, de diferentes diâmetros iniciais, em água parada, saturada com ar (1 bar e 20°C)	82
Figura 3.7	Aumento do tamanho de microbolhas de ar de diferentes diâmetros iniciais, resultante da transferência de oxigénio e azoto do líquido para as bolhas, após aplicação de vácuo ($60 \times 10^{-3} \text{ bar}$)	85
Figura 3.8	Alturas percorridas pelas microbolhas de ar no líquido parado, posteriormente à aplicação de vácuo ($60 \times 10^{-3} \text{ bar}$), tendo em conta a sua expansão, devido à transferência de massa	86
Figura 3.9	Instalação utilizada para detecção de microbolhas formadas na zona de injeção do gás	89

Figura 4.1	Identificação de células de agitação de líquido na coluna de borbulhamento	92
Figura 4.2	Desabsorção de oxigénio na coluna de borbulhamento (1)	100
Figura 4.3	Coluna utilizada para determinação de coeficientes globais de absorção e deabsorção, a baixos caudais de borbulhamento	103
Figura 4.4	Evolução, com o tempo, do tamanho de uma microbolha de oxigénio, de diâmetro inicial igual a 100 μm , imersa em água com oxigénio dissolvido ($C_{O_2} = 32 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$), a 1 bar e 20°C	108
Figura 4.5	Variação, com o tempo, da fracção de gás dissolvido de uma microbolha de oxigénio, relativamente à quantidade inicial, a 1 bar e a 20°C ($d_0 = 100 \mu\text{m}$, $C_{O_2} = 32 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$)	109
Figura 4.6	Comparação dos resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido com os resultados previstos por Yung et al., e com os resultados experimentais de Ward e Tucker, para a evolução de uma bolha de oxigénio (45,69%), azoto (42,85%) e vapor de água (11,46%)	115
Figura 4.7	Evolução de uma microbolha de ar de diâmetro inicial 100 μm , em água com $3,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de oxigénio e $16,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de azoto dissolvidos	120
Figura 4.8	Evolução de uma microbolha de ar de diâmetro inicial 60 μm , em água com $3,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de oxigénio e $16,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de azoto dissolvidos	122
Figura 4.9	Evolução de uma microbolha de ar de diâmetro inicial 20 μm , em água com $3,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de oxigénio e $16,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de azoto dissolvidos	123
Figura 4.10	Evolução, com o tempo, da fracção de oxigénio perdido por uma microbolha de ar de diâmetro inicial igual a 100 μm , quando imersa em água, para diferentes concentrações de oxigénio e azoto dissolvidos	125
Figura 4.11	Evolução, com o tempo, da fracção de oxigénio perdido por uma microbolha de ar de diâmetro inicial igual a 60 μm , quando imersa em água, para diferentes concentrações de oxigénio e azoto dissolvidos	125
Figura 4.12	Evolução, com o tempo, da fracção de oxigénio perdido por uma microbolha de ar de diâmetro inicial igual a 20 μm , quando imersa em água, para diferentes concentrações de oxigénio e azoto dissolvidos	126
Figura 4.13	Evolução de uma microbolha de azoto de diâmetro inicial 100 μm , em água com $3,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de oxigénio e $16,6 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de azoto dissolvidos	128
Figura 4.14	Evolução de uma microbolha de ar de diâmetro inicial 60 μm , em água com $3,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de oxigénio e $16,6 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de azoto dissolvidos	131
Figura 4.15	Evolução de uma microbolha de ar de diâmetro inicial 20 μm , em água com $3,8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de oxigénio e $16,6 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ de azoto dissolvidos	132
Figura 4.16	Evolução, com o tempo, da fracção de oxigénio ganho por uma microbolha de azoto de diâmetro inicial igual a 100 μm , relativamente à massa de oxigénio existente numa microbolha de ar com diâmetro de 100 μm , para diferentes concentrações de oxigénio e azoto dissolvidos	133
Figura 4.17	Evolução, com o tempo, da fracção de oxigénio ganho por uma microbolha de azoto de diâmetro inicial igual a 60 μm , relativamente à massa de oxigénio existente numa microbolha de ar com diâmetro de 60 μm , para diferentes concentrações de oxigénio e azoto dissolvidos	134
Figura 4.18	Evolução, com o tempo, da fracção de oxigénio ganho por uma microbolha de azoto de diâmetro inicial igual a 20 μm , relativamente à massa de oxigénio existente numa microbolha de ar com diâmetro de 20 μm , para diferentes concentrações de oxigénio e azoto dissolvidos	134
Figura 4.19	Tempos de dissolução total e tempos de subida de bolhas de ar e de azoto, em função do seu diâmetro inicial (...)	138

Figura 4.20	Variação de f_{O_2} com o tempo, para uma microbolha de ar de diâmetro inicial 100 μm , em água (a) e em água com anti-espuma (b) (...)	140
Figura 4.21	Variação de f'_{O_2} com o tempo, para uma microbolha de ar de diâmetro inicial 100 μm , em água (a) e em água com anti-espuma (b) (...)	140
Figura 4.22	Variação do tempo de dissolução total de microbolhas de ar, com o respectivo diâmetro inicial, em água (a) e em água com anti-espuma (b) (...)	141
Figura 5.1	Representação de $(kA)_{\text{global}}^d$ em função de h , para o orifício de 0,2 mm (água sem aditivos)	146
Figura 5.2	Representação de $(kA)_{\text{global}}^d$ em função de h , para o orifício de 0,3 mm (água sem aditivos)	146
Figura 5.3	Representação de $(kA)_{\text{global}}^d$ em função de h , para o orifício de 3,0 mm (água sem aditivos)	147
Figura 5.4	Representação de $(kA)_{\text{sl}}$ em função de h , para o orifício de 0,2 mm (água sem aditivos)	154
Figura 5.5	Representação de $(kA)_{\text{sl}}$ em função de h , para o orifício de 0,3 mm (água sem aditivos)	155
Figura 5.6	Representação de $(kA)_{\text{sl}}$ em função de h , para o orifício de 3,0 mm (água sem aditivos)	155
Figura 5.7	Representação de $(kA)_{\text{sl}}$ em função de h , para o orifício de 0,2 mm (água com Fumexol 0,02% v/v)	156
Figura 5.8	Representação de $(kA)_{\text{sl}}$ em função de h , para o orifício de 0,3 mm (água com Fumexol 0,02% v/v)	156
Figura 5.9	Representação de $(kA)_{\text{sl}}$ em função de h , para o orifício de 3,0 mm (água com Fumexol 0,02% v/v)	157
Figura 5.10	Representação de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para o orifício de 0,2 mm (água sem aditivos)	159
Figura 5.11	Representação de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para o orifício de 0,3 mm (água sem aditivos)	159
Figura 5.12	Representação de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para o orifício de 3,0 mm (água sem aditivos)	160
Figura 5.13	Representação de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para o orifício de 0,2 mm (água com Fumexol 0,02% v/v)	160
Figura 5.14	Representação de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para o orifício de 0,3 mm (água com Fumexol 0,02% v/v)	161
Figura 5.15	Representação de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para o orifício de 3,0 mm (água com Fumexol 0,02% v/v)	161
Figura 5.16	Declive das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ versus h , e valores estimados de $(ka^*)_s$ em função do caudal de gás (absorção de oxigénio em água sem aditivos)	165

Figura 5.17	Ordenada na origem das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ versus h , e valores estimados de $(kA)_f$ em função do caudal de gás (absorção de oxigénio em água com Fumexol 0,02% v/v)	167
Figura 5.18	Representação de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para o orifício de 0,3 mm (água sem aditivos)	170
Figura 5.19	Representação de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para o orifício de 3,0 mm (água sem aditivos)	170
Figura 5.20	Representação de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para o orifício de 0,3 mm (água com Fumexol 0,02% v/v)	171
Figura 5.21	Representação de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para o orifício de 3,0 mm (água com Fumexol 0,02% v/v)	171
Figura 5.22	Declive das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ e de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ versus h , em função de $\dot{V}_g$ (água com Fumexol 0,02% v/v)	174
Figura 5.23	Ordenada na origem das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ e de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ versus h , em função de $\dot{V}_g$ (água com Fumexol 0,02% v/v)	174
Figura 5.24	Declive das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ e de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ versus h , em função de $\dot{V}_g$ (água sem aditivos)	176
Figura 5.25	Ordenada na origem das rectas de ajuste de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ e de $[(kA)_{\text{global}}^d - (kA)_{\text{sl}}]$ versus h , em função de $\dot{V}_g$ (água sem aditivos)	176
Figura 5.26	Representação esquemática de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , na ausência de microbolhas	179
Figura 5.27	Representação esquemática de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h , para absorção em água, na ausência de microbolhas, (1) e considerando uma taxa fixa de transferência pelas microbolhas, (2)	180
Figura 5.28	Representação esquemática de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h (...)	180
Figura 5.29	Representação esquemática de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h (...)	181
Figura 5.30	Representação esquemática de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h (...)	182
Figura 5.31	Representação esquemática de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h (...)	183
Figura 5.32	Representação esquemática de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h (...)	185
Figura 5.33	Representação esquemática de $[(kA)_{\text{global}} - (kA)_{\text{sl}}]$ em função de h (...)	186
Figura 5.34	Esquema ilustrativo da distribuição de tamanhos das microbolhas no líquido, ao longo do tempo, para $t_r = 4$ s, à frequência de formação de uma microbolha por segundo	188

