

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

RAMO OPTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA QUÍMICA



**EFEITO DA RAZÃO DE SUBMERSÃO SOBRE OS
PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS
DE UMA COLUNA DE RECIRCULAÇÃO DE LÍQUIDO
ATRAVÉS DE UM TUBO EXTERIOR**

Jorge Alfredo da Costa Vila Nova

**Mestrado em Engenharia Química
Ramo otimização Energética na Indústria Química
Dezembro 2009**

**Orientador: Prof^a Doutora Maria Teresa Martins de
Sena Esteves**

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

RAMO OPTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA QUÍMICA



**ESTUDO DA RAZÃO DE SUBMERSÃO
SOBRE OS PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DE
UMA COLUNA DE RECIRCULAÇÃO DE LÍQUIDO
ATRAVÉS DE UM TUBO EXTERIOR**

Jorge Alfredo da Costa Vila Nova

**Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado em Engenharia Química
do Instituto Superior de Engenharia do Porto**

Júri

Prof.^a Doutora Isabel Maria Brás Pereira

Prof.^a Doutora Maria Margarida Marques Ribeiro

Prof.^a Doutora Maria Teresa Martins de Sena Esteves

Orientador: Prof.^a Doutora Maria Teresa Martins de Sena Esteves

Porto, Dezembro de 2009

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer em primeiro lugar à minha orientadora Dr.^a Maria Teresa Sena Esteves pelo acompanhamento do trabalho e pela colaboração.

Às eng^{as} Magda Marques, Paula Capeto, Ana Carneiro, D.Lurdes e ao Laboratório de Tecnologia do Instituto Superior de Engenharia do Porto, pelo equipamento cedido e pelo auxílio, na resolução de algumas tarefas que foram surgindo ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Gostaria de agradecer à minha prima Isabel Vila Nova pela colaboração na tradução realizada.

Estou grato pelo apoio e incentivo de amigos e colegas.

Por fim gostaria de agradecer à minha família nomeadamente à minha mãe, Dona Maria Júlia, meu padasto, Augusto Ribeiro, às minhas irmãs (Isabel Cristina, Fátima Santos, Mirian Juliana e Márcia Raquel e aos respectivos maridos e namorado) e aos meus pequenos sobrinhos (Adriana Silva, Miguel Silva e Rodrigo Santos) pela paciência que tiveram ao longo destes meses.

Agradeço ao meu pai (Jorge Vila Nova) que infelizmente já não se encontra entre nós e por fim agradeço a mim próprio pela paciência e pelo esforço para terminar esta tese.

Novembro 2009

Jorge Vila Nova

RESUMO

No trabalho realizado nesta tese, procedeu-se ao estudo hidrodinâmico de uma coluna de borbulhamento de recirculação externa do líquido (CREL), que permitiu ampliar o conhecimento já existente sobre este tipo de colunas. Para realizar este estudo utilizaram-se líquidos viscosos Newtonianos, nomeadamente soluções aquosas de glicerina com viscosidades entre 0,007 e 0,522 Pa.s. Para a gama de caudais de ar injectados, $1,5 \times 10^{-5}$ até $1,35 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, o ar ascendia ao longo da coluna de borbulhamento sob a forma de bolhas tubulares. Após a realização dos ensaios, verificou-se que o regime de escoamento do líquido entre bolhas tubulares variou desde o tipo laminar até transição ($1,9 < Re_{vL} < 3277$) e o padrão de escoamento na esteira das referidas bolhas variou do regime laminar até ao regime turbulento ($12,1 < Re_v < 3297$).

Nos ensaios experimentais foram utilizadas duas colunas de borbulhamento com diferentes diâmetros internos de 22 e 32 mm. A razão de submersão, β , seleccionada foi de 0,85. Este valor foi escolhido por ser significativamente diferente dos usados em estudos anteriores (0,935 por Santos (2004), Santos (2005) e 0,91 por Rangel (2008)) de forma a poder analisar a influência da razão de submersão sobre os parâmetros hidrodinâmicos.

Nos ensaios realizados foram determinadas a retenção do gás na coluna e a velocidade superficial do líquido em escoamento no interior da coluna de borbulhamento. Os valores da retenção do gás foram comparados com valores teóricos previstos por equações empíricas de Nicklin *et al* (1962). Estes valores também foram comparados com valores obtidos experimentalmente em trabalhos anteriores, onde se utilizaram razões de submersão de 0,935 e 0,91.

Após análise dos valores da retenção verificou-se que estes eram mais elevados para as soluções de maior viscosidade e menor diâmetro da coluna. Para as experiências realizadas com as soluções com viscosidades entre 0,52 Pa.s e 0,053 Pa.s, os valores experimentais eram inferiores aos previstos por Nicklin *et al* (1962) para regime laminar tanto na coluna de 22 mm como na coluna de 32 mm. Para a solução com 0,007 Pa.s de viscosidade os valores experimentais situavam-se na zona de transição entre o regime laminar e o regime turbulento em ambas as colunas. Verificou-se que a diminuição da razão de submersão de 0,935 para 0,85 aumentou significativamente a retenção em todas as experiências realizadas.

A velocidade superficial média de circulação do líquido variava na razão inversa do diâmetro e da viscosidade. A diminuição da retenção provocou uma diminuição significativa na velocidade do líquido.

Palavras-chave – escoamentos bifásicos gás-líquido, colunas de borbulhamento orientadas por tubos, bolhas tubulares.

SUMMARY

This thesis is about the study of Hydrodynamics of airlift columns (reactors), in particular of the external loop type (ELALR), which allowed to amplify the already existing knowledge concerning this type of columns. To accomplish this study, Newtonian viscous fluids were used, namely aqueous solutions of glycerine with a viscosity between 0,007 e 0,522 Pa.s.

In the range of injected air torrents, of $1,5 \times 10^{-5}$ to $1,35 \times 10^{-4}$ m³/s, the air ascended along the airlift column under the shape of Taylor bubbles. Following these tests, it was verified that the liquid flow off between Taylor bubbles changed from the laminar flow to transition flow ($1,9 < Re_{vL} < 3276,7$) and the flow off pattern in the bubbles way varied between laminar flow and turbulent flow ($12,1 < Re_v < 3296,6$).

On the experimental studies two airlift columns were used, with different internal diameters of 22 and 32 mm. The submergence ratio, β , selected was 0,85. This value was chosen as it was significantly different from those used on previous studies (0,935 by Santos M., 0,938 by Santos R. and 0,91 by Rangel A.) in order to be possible to analyse the influence of the submergence ratio over the hydrodynamic parameters.

On the experiments it was made hold-up of gas on the column and the superficial liquid velocity, inside the airlift column. The experimental hold up of gas was compared with the values predicted by the equations of Nicklin *et al.* These values were also compared with those obtained by previous experiments, where submergence ratios of 0,935 and 0,91 were applied.

The analysis of the hold-up values showed that these were higher for the most viscous solutions and smaller diameter column. Solutions with viscosity levels between 0,52 Pa.s and 0,053 Pa.s, showed experimental values under those calculated by Nicklin *et al* for laminar flow, both in 22 column and 32 mm. Experimental values for viscosity 0,007 Pa.s were in the transition zone between laminar flow and turbulent flow predicted by Nicklin *et al* in both columns. The results showed the decrease of the submergence ratio from 0,935 to 0,85 made hold-up of gas increase significantly

The average superficial velocity of the fluid circulation varied in the inverse ratio to the diameter and viscosity. The decrease of the submergence ratio made the fluid superficial liquid velocity decrease significantly.

Key words – gas-liquid bi-phase flow off, airlift columns guided by tubes, Taylor bubbles.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
SUMMARY	vii
ÍNDICE	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xv
LISTA DE SÍMBOLOS	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento do Tema	1
1.2. Objectivos	3
1.3. Estrutura do trabalho	3
2. CONCEITOS BÁSICOS	5
2.1. Caracterização de uma bolha tubular	6
2.1.1. Velocidade das bolhas tubulares	7
2.1.2. Coalescência entre bolhas tubulares	10
2.2. Retenção de gás no interior da coluna	13
3. DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL	15
3.1. Caracterização dos fluidos	16
3.2. Procedimento experimental e esquema da instalação	18
3.2.1. Procedimento de arranque da instalação	19
3.2.2. Procedimento para determinação do caudal volumétrico de Líquido	22
3.2.3. Procedimento para determinação da retenção	23
3.2.4. Procedimento para determinação da viscosidade	24
4. RESULTADOS	27
4.1. Retenção de gás na coluna de borbulhamento	28
4.2. Comparação da retenção de gás na coluna de borbulhamento para várias razões de submersão	43
4.3. Velocidade média do líquido em escoamento na coluna de borbulhamento	49
4.4. Comparação dos valores experimentais da velocidade do líquido para diferentes razões de submersão	51
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
5.1. Conclusões	59
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

Apêndice A - Cálculo de incertezas	63
A.1 Método	63
A.2 Retenção experimental	64
A.3 Caudal volumétrico de líquido	65
A.4 Velocidade do líquido	66
A.5 Velocidade teórica de uma bolha tubular.....	66
A.6 Retenção teórica	67
A.7 Valor do parâmetro c experimental.....	67
A.8 Velocidade relativa do líquido.....	68
A.9 Número de Reynolds do líquido em escoamento	69
A.10 Número de Reynolds na esteira das bolhas tubulares.....	69
Apêndice B - Resultados obtidos.....	71
Apêndice C- Recuperação de glicerina	79
C.1 -Utilização de um tanque com aquecimento por meio de uma resistência eléctrica ...	79
C.2 - Utilização de um tanque com aquecimento por meio de Rotavapor	81
C.3 -Utilização de manta de aquecimento	81
Apêndice D – Viscosímetro de Haake	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Esquema de uma CRIL (a) e esquema de uma CREL (b) (figura cedida por Pereira <i>et al</i> (2007)).	1
Figura 2.1 - Fotografias de uma bolha tubular (a), calotes esféricas (b), bolhas de forma aproximadamente esféricas(c) . (Fotografias cedidas por (a) e (b) Pereira <i>et al</i> (2007);(c) Santos (2004))	5
Figura 2.2 - Espessura da película de líquido(δ), comprimento da bolha (L) e comprimento do "nariz" da bolha (l) (esquema cedido por Santos(2004))	6
Figura 2.3 - Representação de esquemas de (a) velocidade do líquido em torno de uma bolha tubular em relação a um referencial fixo e no líquido entre bolhas (v_L) (b) caudais de gás e de líquido nas secções 1 e 2 da coluna de borbulhamento (esquema cedido por Santos (2004)).	7
Figura 2.4 - Fotografias sequenciais da coalescência entre duas bolhas tubulares (a) plano afastado (b) plano próximo (fotos cedidas por Santos (2004))	10
Figura 2.5 - Representação esquemática do comportamento da esteira para os regimes (a) laminar (b) transição (c) turbulento (esquema cedido por Santos (2004))	11
Figura 2.6 - Perfis de velocidade no líquido no interior da coluna num referencial preso à bolha (a) acima do "nariz" da bolha e (b) no filme de líquido entre a bolha e a parede do tubo (esquema cedido por Santos (2004)).	12
Figura 3.1 - Diagrama da instalação experimental (esquema cedido por Pereira <i>et al.</i> (2007)).	18
Figura 3.2 – Vista geral da instalação experimental.	20
Figura 3.3 - Sistema de regulação do caudal de ar(a) Par de rotâmetros utilizados (b) (Fotos cedidas por Pereira <i>et al.</i> (2007)).	21
Figura 3.4 - Balança de prato OHAUS (grupo Pioneer TM), carga máxima 4200g e 0,01g de precisão.	23
Figura 3.5 - Viscosímetro de Brookfield – Model DVII+ (a) com sistema de refrigeração/aquecimento (b) (fotos cedidas por Pereira <i>et al</i> (2007)).	24
Figura 3.6 - Viscosímetro de Queda de bola da marca Haake Viscosimetres (a) com acessórios (b) e com sistema de refrigeração/aquecimento (c).	25
Figura 4.1 - Comparação entre os valores experimentais da retenção e os valores previstos pela equação de Nicklin, usando uma solução aquosa de glicerina com $\mu= 0,520$ Pa.s ($\pm 0,006$) e $\rho=1250$ kg/m ³ ($\pm 0,6$) na coluna de 22 mm de diâmetro interno	29
Figura 4.2 - Comparação entre os valores experimentais da retenção e os valores previstos pela equação de Nicklin, usando uma solução aquosa de glicerina com $\mu= 0,520$ Pa.s ($\pm 0,008$) e $\rho=1248$ kg/m ³ ($\pm 0,3$) na coluna de 32 mm de diâmetro interno	30

Figura 4.3 - Comparação entre os valores experimentais da retenção e os valores previstos pela equação de Nicklin, usando uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,274$ Pa.s ($\pm 0,004$) e $\rho = 1234$ kg/m ³ ($\pm 0,1$) na coluna de 22 mm de diâmetro interno.....	31
Figura 4.4 - Comparação entre os valores experimentais da retenção e os valores previstos pela equação de Nicklin, usando uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,278$ Pa.s ($\pm 0,002$) e $\rho = 1248$ kg/m ³ ($\pm 0,5$) na coluna de 32 mm de diâmetro interno.....	32
Figura 4.5 - Comparação entre os valores experimentais da retenção e os valores previstos pela equação de Nicklin, usando uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,066$ Pa.s ($\pm 0,001$) e $\rho = 1209$ kg/m ³ ($\pm 0,1$) na coluna de 22 mm de diâmetro interno.....	34
Figura 4.6 - Comparação entre os valores experimentais da retenção e os valores previstos pela equação de Nicklin, usando uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,065$ Pa.s ($\pm 0,001$) e $\rho = 1210$ kg/m ³ ($\pm 0,1$) na coluna de 32 mm de diâmetro interno.....	35
Figura 4.7 - Comparação entre os valores experimentais da retenção e os valores previstos pela equação de Nicklin, usando uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,053$ Pa.s ($\pm 0,001$) e $\rho = 1207$ kg/m ³ ($\pm 0,1$) na coluna de 22 mm de diâmetro interno.....	36
Figura 4.8 - Comparação entre os valores experimentais da retenção e os valores previstos pela equação de Nicklin, usando uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,052$ Pa.s ($\pm 0,001$) e $\rho = 1207$ kg/m ³ ($\pm 0,1$) na coluna de 32 mm de diâmetro interno.....	37
Figura 4.9 - Comparação entre os valores experimentais da retenção e os valores previstos pela equação de Nicklin, usando uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,007$ Pa.s ($\pm 0,00004$) e $\rho = 1133$ kg/m ³ ($\pm 0,1$) na coluna de 22 mm de diâmetro interno.....	39
Figura 4.10 - Comparação entre os valores experimentais da retenção e os valores previstos pela equação de Nicklin, usando uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,007$ Pa.s ($\pm 0,00003$) e $\rho = 1134$ kg/m ³ ($\pm 0,1$) na coluna de 32 mm de diâmetro interno.....	40
Figura 4.11 - Valores experimentais da retenção em função da velocidade superficial do líquido, para diferentes viscosidades dinâmicas para a coluna de 22 mm de diâmetro interno.	41
Figura 4.12 - Valores experimentais da retenção em função da velocidade superficial do líquido, para diferentes viscosidades dinâmicas para a coluna de 32 mm de diâmetro interno.	42
Figura 4.13 - Comparação dos valores experimentais da retenção para diferentes razões de submersão (0,85 e 0,935) na coluna de 32 mm de diâmetro ($\mu = 0,520$ Pa.s).....	43
Figura 4.14 - Comparação dos valores experimentais da retenção para diferentes razões de submersão (0,85; 0,91 ;0,924 e 0,935) na coluna de 22 mm de diâmetro ($\mu = 0,268 - 0,274$ Pa.s).....	44
Figura 4.15 - Comparação dos valores experimentais da retenção para diferentes razões de submersão (0,85;0,91 e 0,935) na coluna de 32 mm de diâmetro ($\mu = 0,274 - 0,298$ Pa.s)..	45

Figura 4.16 - Comparação dos valores experimentais da retenção para diferentes razões de submersão (0,85; e 0,935) na coluna de 22 mm de diâmetro ($\mu = 0,065$ Pa.s).....	45
Figura 4.17 - Comparação dos valores experimentais da retenção para diferentes razões de submersão (0,85;0,91;0,935 e 0,938) na coluna de 22 mm de diâmetro e viscosidades semelhantes ($\mu = 0,0415 - 0,053$ Pa.s).....	46
Figura 4.18 - Comparação dos valores experimentais da retenção para diferentes razões de submersão (0,85;0,91;0,935 e 0,938) na coluna de 32 mm de diâmetro ($\mu = 0,05 - 0,053$ Pa.s).....	47
Figura 4.19 - Comparação dos valores experimentais da retenção para diferentes razões de submersão (0,85; 0,935) na coluna de 22 mm de diâmetro ($\mu = 0,004$ a $0,01$ Pa.s).....	47
Figura 4.20 - Comparação dos valores experimentais da retenção para diferentes razões de submersão (0,85;0, 0,935) na coluna de 32 mm de diâmetro ($\mu = 0,007$ a $0,01$ Pa.s).....	48
Figura 4.21 - Valores experimentais da velocidade do líquido em função do caudal de gás injectado para diferentes viscosidades usando a coluna de diâmetro interno de 32 mm.	50
Figura 4.22 - Valores experimentais da velocidade do líquido em função do caudal de gás injectado para diferentes viscosidades usando a coluna de diâmetro interno de 22 mm.	50
Figura 4.23 - Valores experimentais da velocidade do líquido em função do caudal de gás injectado para soluções aquosas de glicerina com viscosidade de 0,520-0,522 Pa.s usando a coluna de diâmetro interno de 32 mm.	51
Figura 4.24 - Valores experimentais da velocidade do líquido em função do caudal de gás injectado para soluções aquosas de glicerina com viscosidade de 0,274-0,298 Pa.s usando a coluna de diâmetro interno de 32 mm.	52
Figura 4.25 - Valores experimentais da velocidade do líquido em função do caudal de gás injectado para soluções aquosas de glicerina com viscosidade de 0,268-0,275 Pa.s usando a coluna de diâmetro interno de 22 mm.	53
Figura 4.26 - Valores experimentais da velocidade do líquido em função do caudal de gás injectado para soluções aquosas de glicerina com viscosidade de 0,065 Pa.s usando a coluna de diâmetro interno de 22 mm.	54
Figura 4.27 - Valores experimentais da velocidade do líquido em função do caudal de gás injectado para soluções aquosas de glicerina com viscosidade de 0,05-0,053 Pa.s usando a coluna de diâmetro interno de 32 mm.	55
Figura 4.28 - Valores experimentais da velocidade do líquido em função do caudal de gás injectado para soluções aquosas de glicerina com viscosidade de 0,0415-0,053 Pa.s usando a coluna de diâmetro interno de 22 mm.	56
Figura 4.29 - Valores experimentais da velocidade do líquido em função do caudal de gás injectado para soluções aquosas de glicerina com viscosidade de 0,005-0,010 Pa.s usando a coluna com diâmetro interno de 32 mm.....	57

Figura 4.30 - Valores experimentais da velocidade do líquido em função do caudal de gás injectado para soluções aquosas de glicerina com viscosidade de 0,004-0,010 Pa.s usando a coluna com diâmetro interno de 22 mm.....58

Gráfico C1 – Variação da concentração da solução de glicerina em função do tempo de aquecimento para cada um dos dias.80

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Propriedades físicas das soluções aquosas de glicerina para os diferentes ensaios realizados.....	16
Tabela 4.1 - Intervalos para os números de Reynolds, Re_{v_L} e Re_V , correspondente a diferentes regimes de escoamento no líquido e na esteira.	27
Tabela 4.2 - Valores experimentais da constante C_{exp} , dos números de Reynolds no líquido (Re_{v_L}) e na esteira (Re_V) em função da velocidade média do líquido (v_L), com $\alpha = 0,188$ para uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,520$ Pa.s ($\pm 0,006$) e $\rho = 1250$ kg/m ³ ($\pm 0,6$) na coluna de 22 mm de diâmetro interno.	29
Tabela 4.3 - Valores experimentais da constante C_{exp} , dos números de Reynolds no líquido (Re_{v_L}) e na esteira (Re_V) em função da velocidade média do líquido (v_L), com $\alpha = 0,245$ para uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,520$ Pa.s ($\pm 0,008$) e $\rho = 1248$ kg/m ³ ($\pm 0,3$) na coluna de 32 mm de diâmetro interno.	30
Tabela 4.4 - Valores experimentais da constante C_{exp} , dos números de Reynolds no líquido (Re_{v_L}) e na esteira (Re_V) em função da velocidade média do líquido (v_L), com $\alpha = 0,245$ para uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,274$ ($\pm 0,004$) e $\rho = 1235$ kg/m ³ ($\pm 0,1$) na coluna de 22 mm de diâmetro interno.....	31
Tabela 4.5 - Valores experimentais da constante C_{exp} , dos números de Reynolds no líquido (Re_{v_L}) e na esteira (Re_V) em função da velocidade média do líquido (v_L), com $\alpha = 0,280$ para uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,278$ Pa.s ($\pm 0,002$) e $\rho = 1237$ kg/m ³ ($\pm 0,1$) na coluna de 32 mm de diâmetro interno.	32
Tabela 4.6 - Valores experimentais da constante C_{exp} , dos números de Reynolds no líquido (Re_{v_L}) e na esteira (Re_V) em função da velocidade média do líquido (v_L), com $\alpha = 0,330$ para uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,066$ Pa.s ($\pm 0,001$) e $\rho = 1209$ kg/m ³ ($\pm 0,1$) na coluna de 22 mm de diâmetro interno.	34
Tabela 4.7 - Valores experimentais da constante C_{exp} , dos números de Reynolds no líquido (Re_{v_L}) e na esteira (Re_V) em função da velocidade média do líquido (v_L), com $\alpha = 0,280$ para uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,065$ Pa.s ($\pm 0,001$) e $\rho = 1210$ kg/m ³ ($\pm 0,1$) na coluna de 32 mm de diâmetro interno.	35
Tabela 4.8 - Valores experimentais da constante C_{exp} , dos números de Reynolds no líquido (Re_{v_L}) e na esteira (Re_V) em função da velocidade média do líquido (v_L), com $\alpha = 0,322$ para uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,053$ Pa.s ($\pm 0,001$) e $\rho = 1207$ kg/m ³ ($\pm 0,1$) na coluna de 22 mm de diâmetro interno.	36
Tabela 4.9 - Valores experimentais da constante C_{exp} , dos números de Reynolds no líquido (Re_{v_L}) e na esteira (Re_V) em função da velocidade média do líquido (v_L), com $\alpha = 0,245$ para	

uma solução aquosa de glicerina com $\mu= 0,052 \text{ Pa.s } (\pm 0,001)$ e $\rho=1207 \text{ kg/m}^3 (\pm 0,1)$ na coluna de 32 mm de diâmetro interno.	37
Tabela 4.10 - Valores experimentais da constante C_{exp} , dos números de Reynolds no líquido (Re_{v_L}) e na esteira (Re_v) em função da velocidade média do líquido (v_L), com $\alpha = 0,345$ para uma solução aquosa de glicerina com $\mu= 0,007 \text{ Pa.s } (\pm 0,00004)$ e $\rho=1133 \text{ kg/m}^3 (\pm 0,1)$ na coluna de 22 mm de diâmetro interno.	39
Tabela 4.11 - Valores experimentais da constante C_{exp} , dos números de Reynolds no líquido (Re_{v_L}) e na esteira (Re_v) em função da velocidade média do líquido (v_L), com $\alpha = 0,245$ para uma solução aquosa de glicerina com $\mu= 0,007 \text{ Pa.s } (\pm 0,00003)$ e $\rho=1134 \text{ kg/m}^3 (\pm 0,1)$ na coluna de 32 mm de diâmetro interno.	40
Tabela A.1 – Erros dos equipamentos utilizados nas determinações das grandezas experimentais.	64
Tabela B.1 – Valores experimentais e calculados na representação dos gráficos respeitantes à retenção na coluna de 22 mm de diâmetro interno.	72
Tabela B.2 – Valores experimentais e calculados na representação dos gráficos.	73
Tabela B.3 –Valores das incertezas da retenção experimental para regime laminar e turbulento na coluna de 22 mm de diâmetro interno.	74
Tabela B.4 –Valores das incertezas da retenção experimental para regime laminar e turbulento na coluna de 32 mm de diâmetro interno.	75
Tabela B.5 - Valores das incertezas dos números de Reynolds, Re_v , Re_{v_L} e da constante C_{exp} para os ensaios realizados com a coluna de 22 mm.	76
Tabela B.6 - Valores das incertezas dos números de Reynolds, Re_v , Re_{v_L} e da constante C_{exp} para os ensaios realizados com a coluna de 32 mm.	77
Tabela C.1 - Dados obtidos na recuperação da glicerina.	80
Tabela D.1 - Determinação da viscosidade pelo viscosímetro de Haake.	84

LISTA DE SÍMBOLOS

A_C	Área da secção recta da coluna de borbulhamento	m^2
B_x	Incerteza sistemática da grandeza x	
c_{exp}	Constante experimental usada na correcção da velocidade	
c	Constante usada na correcção da velocidade	
D	Diâmetro interno da coluna de borbulhamento	m
e	Espessura da coluna de borbulhamento	m
E_0	Número de Eötvos	
Fr	Número de Froud	
g	Aceleração da gravidade	m/s^2
L	Comprimento da bolha tubular	m
l	Comprimento do nariz a partir do qual a película de líquido em torno da bolha tubular está perfeitamente desenvolvido	m
L_G	Altura da coluna de borbulhamento ocupada pelo gás	m
L_C	Altura da coluna de borbulhamento	m
L_{ent}	Comprimento de tubo necessário à estabilização do escoamento	m
L_N	Altura de líquido desde a zona de injeção até à superfície	m
m	Massa de líquido	kg
n	Número de bolhas tubulares	
P	Pressão	Pa
P_x	Incerteza de precisão da grandeza x	
Q_G	Caudal volumétrico de ar injectado	m^3/s
Q_L	Caudal volumétrico de líquido em circulação no interior da coluna	m^3/s
Q_M	Caudal mássico de líquido recolhido	kg
R	Raio da coluna	m
Re_{vL}	Número de Reynolds baseado na velocidade do líquido em escoamento	
Re_V	Número de Reynolds baseado na velocidade média do líquido relativamente à bolha	
T	Temperatura	$^{\circ}C$
t	tempo	s
t_v	Tempo de ascensão de uma bolha tubular	s
V	Velocidade média do líquido relativamente à bolha	m/s
V_C	Volume da coluna interna	m^3
v_c	Velocidade do líquido ascendente no nariz da bolha	m/s
v_L	Velocidade superficial do líquido na coluna de borbulhamento	m/s

V_G	Volume do gás no interior da coluna	m^3
v_m	Velocidade média na película de líquido relativamente à parede da coluna	m/s
Vol	Volume de líquido recolhido	m^3
v_S	Velocidade de ascensão de uma bolha tubular	m/s
v_{S0}	Velocidade de ascensão de uma bolha tubular isolada	m/s
V_S	Volume total das bolhas tubulares no interior da coluna	m^3
U_x	Incerteza associada à grandeza x	

Símbolos gregos

α	Factor correctivo, adimensional, à velocidade de subida de uma bolha tubular isolada	
ε	Retenção média do gás na coluna interna	
β	Razão de submersão	
ν	Viscosidade cinemática do líquido	m^2/s
μ	Viscosidade dinâmica do líquido	$Pa.s$
δ	Espessura da película de líquido em torno da bolha tubular	m
ρ	Massa volúmica do líquido	kg/m^3
σ	Tensão superficial do líquido	N/m

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do Tema

As colunas de recirculação de líquido por borbulhamento, quer sejam de recirculação interna, quer sejam recirculação externa são utilizadas em diversos processos, nomeadamente:

- Tratamento de esgotos
- Tratamento de águas residuais
- Efluentes gasosos
- Transporte de líquidos
- Produção de microorganismos
- Aquecimento e arrefecimento de reactores nucleares

Este tipo de equipamentos são eficientes para sistemas onde seja necessário ocorrer uma boa mistura entre fases. As colunas de recirculação podem ser de dois tipos, conforme o processo de borbulhamento:

- ✓ Coluna de recirculação interna de líquido (CRIL) - caracteriza-se pela injeção de gás na base de um coluna interna o que provoca a circulação ascendente do líquido nesta coluna interna, e recirculação descendente pelo espaço anelar entre duas colunas concêntricas, a interna (onde ocorre injeção do gás) e a externa.
- ✓ Coluna de recirculação externa de líquido (CREL) - constituída por duas colunas, ligadas na base e no topo, em que a recirculação do líquido é efectuada através da coluna associada externamente à de borbulhamento.

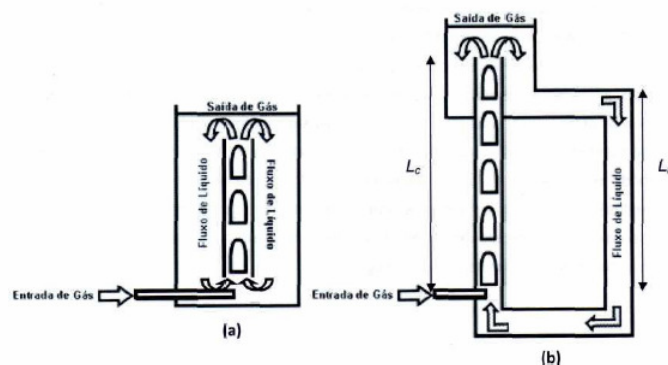


Figura 1.1 - Esquema de uma CRIL (a) e esquema de uma CREL (b) (figura cedida por Pereira *et al* (2007)).

O movimento do líquido, nestes dois tipos de colunas de borbulhamento, é resultante do facto de densidade da mistura gás-líquido no interior da coluna de borbulhamento ser inferior à densidade do líquido na coluna externa na CREL ou entre colunas na CRIL.

Assim o líquido, com movimento ascendente na coluna de borbulhamento, desloca-se desta para a coluna externa (ou espaço anelar entre colunas) onde tem um movimento descendente.

A circulação do líquido para o mesmo caudal de gás aumenta com o aumento da razão de submersão, β , sendo a velocidade superficial do líquido superior para razões de submersão inferiores.

A razão de submersão, β , é definida como sendo a razão entre a altura do líquido na coluna externa, L_N , e a altura do líquido na coluna de borbulhamento, L_C , medidas desde a zona de injeção de gás.

As colunas de borbulhamento têm sido aplicadas numa grande variedade de processos pois constituem sistemas versáteis e de fácil manutenção, além de permitirem uma boa mistura e elevadas taxas de transferência de calor e massa.

Devido a estes factores, é necessário realizar novos estudos que permitam compreender a hidrodinâmica destas colunas.

Entre os estudos efectuados com colunas de borbulhamento e utilizando líquidos de baixa viscosidade podemos citar os realizados por Nicklin *et al* (1962), Moissis and Griffith (1962), Merchuk e Stein (1981), Dukler *et al* (1985), Chisti *et al* (1988), Young *et al* (1991), Akita *et al* (1994), Merchuk e Berzin (1995) e Pinto *et al* (2001).

A informação existente sobre estas colunas a operar com líquidos de maior viscosidade é mais escassa embora de importante aplicação em bioreactores. Pesquisas recentes de Mayor *et al* (2007), Santos (2004) e Rangel (2008) reportam resultados da hidrodinâmica de colunas a operar com líquidos viscosos e gás em escoamento em regime de bolhas tubulares. Santos (2004) utilizou uma coluna do tipo CRIL, com uma razão de submersão de 0,935. Rangel (2008) por sua vez utilizou uma coluna do tipo CREL, com as mesmas dimensões, tendo variado a razão de submersão para 0,91. Nestes trabalhos a variação da razão de submersão não resultou em diferenças significativas nos parâmetros hidrodinâmicos, sabendo-se no entanto que é uma das variáveis de operação com marcada influência na circulação do líquido. Assim o presente estudo surge como uma continuação do estudo realizado por Rangel (2008), tendo-se optado por variar significativamente a razão de submersão de forma a poder analisar a respectiva influência na hidrodinâmica de colunas de recirculação de líquido.

1.2. Objectivos

O presente trabalho teve como objectivo o estudo hidrodinâmico de colunas de recirculação de líquido por borbulhamento através de um tubo exterior para uma taxa de retenção de 0,85. Foi feito o estudo da retenção de gás na coluna e da velocidade média de circulação de líquido. As colunas utilizadas tinham os diâmetros de 22 e 32 mm. A viscosidade das soluções variou entre 0,007 e 0,522 Pa.s para caudais de gás injectado de $1,5 \times 10^{-5}$ até $1,35 \times 10^{-4}$ m³/s. Para estas condições de operação o escoamento do gás fazia-se sob a forma de bolhas tubulares. Foi possível analisar diferentes regimes de escoamento do líquido entre bolhas tubulares e na esteira das referidas bolhas.

Os valores da retenção do gás foram comparados com valores teóricos previstos pelas equações empíricas de Nicklin *et al.* Os valores da retenção de gás e velocidade superficial foram comparados com os resultados experimentais obtidos nos trabalhos realizados por Santos (2004), Santos (2005) e Rangel (2008) que utilizaram razões de submersão de 0,935 e 0,91.

Foi ainda estudada a possibilidade de concentrar até 99,5% v/v em glicerina as soluções aquosas de glicerina mais diluídas existentes em grande quantidade no laboratório. Desta forma reaproveitar-se-iam as soluções nas experiências a realizar nas colunas de borbulhamento e evitar-se-ia a aquisição de soluções concentradas. Dado tratar-se de um estudo secundário em relação aos objectivos principais do trabalho, a descrição dos estudos realizados encontra-se no apêndice C.

1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho terá a seguinte estrutura:

- Capítulo 2 – Conceitos básicos para o estudo hidrodinâmico das colunas de borbulhamento;
- Capítulo 3 – Descrição da instalação utilizada e o procedimento para realização de ensaios;
- Capítulo 4 – Resultados dos parâmetros hidrodinâmicos estudados e comparação com resultados anteriores;
- Capítulo 5 – Conclusão e sugestão para trabalhos futuros.

2. CONCEITOS BÁSICOS

No escoamento de um gás através de um líquido, quer este esteja parado ou em movimento, ocorre a formação de bolhas. O tipo de bolha formada irá depender das propriedades físicas do sistema bifásico, dos caudais de gás injectado e dimensões da coluna de borbulhamento (diâmetro e altura da coluna). Entre as propriedades físicas do sistema bifásico podemos citar:

- Viscosidade;
- Densidade;
- Tensão superficial

Os tipos de bolha que se podem formar são:

- ✓ Bolhas tubulares, bolhas de Taylor ou slugs – Caracterizam-se por terem a forma de “bala”, comprimentos heterogêneos e diâmetros aproximadamente iguais aos da coluna onde se formam. Deslocam-se através do líquido que as rodeia, formando-se uma película entre as bolhas tubulares e a parede da coluna (Figura 2.1 (a));
- ✓ Calotes esféricas - As calotes esféricas são bolhas de gás em forma de “cogumelo” e tamanhos heterogêneos, distribuídas uniformemente pelo líquido como se mostra na figura 2.1 (b);
- ✓ Bolhas esféricas - As bolhas de forma aproximadamente esférica também têm tamanhos heterogêneos, mas encontram-se mais ou menos dispersas no líquido (Figura 2.1 (c)).

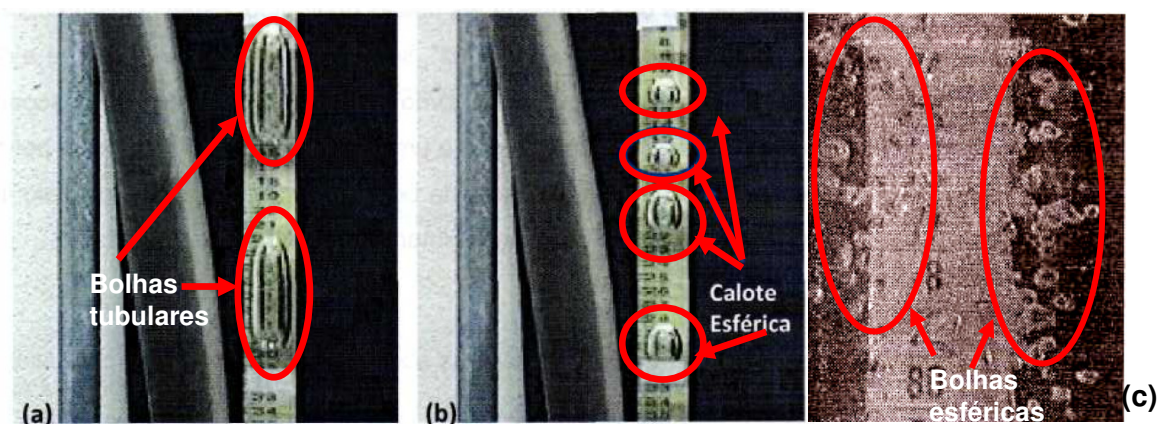


Figura 2.1 - Fotografias de uma bolha tubular (a), calotes esféricas (b), bolhas de forma aproximadamente esféricas(c) . (Fotografias cedidas por (a) e (b) Pereira *et al* (2007);(c) Santos (2004))

Neste trabalho foi feito o estudo sobre um sistema gás-líquido onde o gás assume a forma de bolhas tubulares.

Autores como Davidson e Harrison (1963), chamam bolhas tubulares às bolhas que têm diâmetros equivalentes maiores que 1/3 do diâmetro da coluna de borbulhamento utilizada (O diâmetro equivalente corresponde ao diâmetro de uma esfera que possui o mesmo volume da bolha tubular).

2.1. Caracterização de uma bolha tubular

As bolhas tubulares apresentam são caracterizadas por serem longas bolhas de forma cilíndrica com um filme de líquido em escoamento em torno delas e uma porção de líquido na zona traseira das bolhas, a esteira, que acompanha o movimento ascendente da bolha.

As bolhas tubulares podem ser caracterizadas por alguns parâmetros. Entre estes podem citar-se:

- Comprimento, L – medido desde a base à outra extremidade ovalada (“nariz”). Depende, principalmente, do diâmetro da coluna, do caudal de ar injectado e das propriedades físicas do líquido (especialmente da viscosidade).
- Comprimento do “nariz”, l , – segundo Nicklin *et al* (1962) é a distância a partir da qual a película de líquido em torno da bolha tubular está em escoamento perfeitamente desenvolvido, correspondendo a uma espessura, δ , constante. Esta película constitui um jacto na zona da base da bolha, que ao ser absorvido pelo líquido promove uma zona de intensa mistura, normalmente denominada de esteira.

Estas características estão demonstradas na figura 2.2.

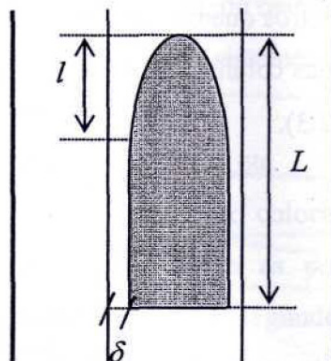


Figura 2.2 - Espessura da película de líquido(δ), comprimento da bolha (L) e comprimento do “nariz” da bolha (l) (esquema cedido por Santos(2004)).

2.1.1. Velocidade das bolhas tubulares

Durante a injeção contínua de gás na base da coluna são formadas bolhas que se deslocam ao longo da coluna vertical, com uma velocidade, v_s . Esta velocidade é influenciada tanto pela injeção do gás como pela recirculação de líquido.

Segundo Nicklin (1962), a velocidade de subida de uma bolha tubular, v_s , é o somatório da velocidade do líquido ascendente acima do “nariz” da bolha, v_c , e da velocidade de uma bolha tubular isolada ascendendo através de um líquido estagnado, v_{s0} .

$$v_s = v_c + v_{s0} \quad (2.1)$$

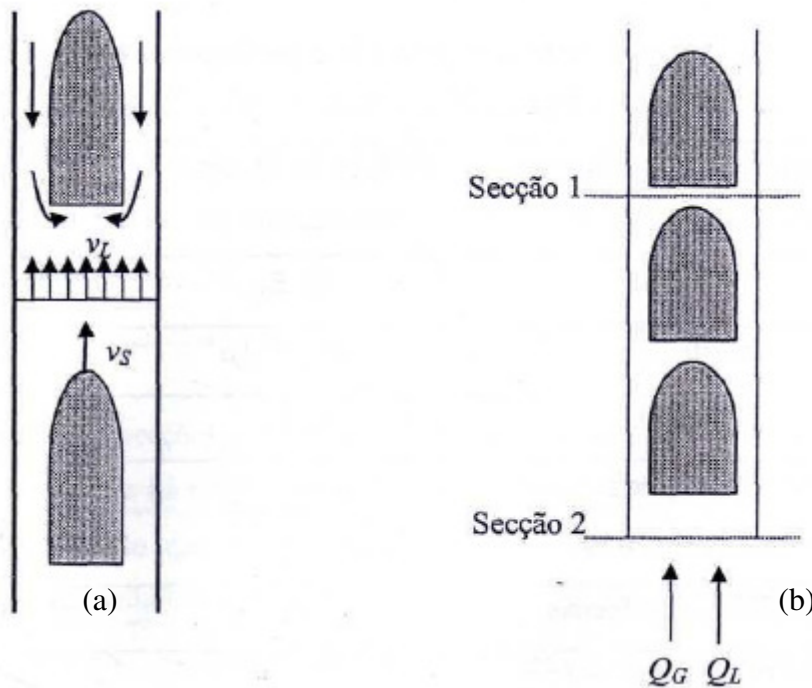


Figura 2.3 - Representação de esquemas de (a) velocidade do líquido em torno de uma bolha tubular em relação a um referencial fixo e no líquido entre bolhas (v_L) (b) caudais de gás e de líquido nas secções 1 e 2 da coluna de borbulhamento (esquema cedido por Santos (2004)).

Na figura 2.3 (b) estão assinaladas duas secções. A secção transversal 1, corresponde à zona entre duas bolhas tubulares consecutivas, onde o líquido circula com uma velocidade superficial média, v_L . A secção 2 situa-se na base da coluna, onde há injeção contínua de um determinado caudal de gás, Q_G , e onde entra o líquido recirculado (vindo do tubo de recirculação), a um caudal volumétrico, Q_L . Aplicando a equação da continuidade entre a secção 1 e a secção 2 obtém-se:

$$v_L = \frac{Q_G + Q_L}{A_C} \quad (2.2)$$

A velocidade de subida de uma bolha isolada, v_{s0} , em líquidos de baixa viscosidade, segundo estudos teóricos efectuados por Dumitrescu (1943) e Davis e Taylor (1950), é dada pela seguinte expressão:

$$v_{s0} = \alpha \sqrt{gD} \quad (2.3)$$

Sendo α igual a 0,345.

Resumindo, a velocidade de subida de uma bolha isolada depende apenas do diâmetro interno da coluna, D , onde são formadas as bolhas tubulares.

Segundo White e Beardmore (1962) este valor de α apenas é aplicável quando as forças que predominam no escoamento são as inerciais (forças viscosas e interfaciais desprezáveis). Para este regime inercial aqueles autores obtiveram os seguintes limites para os números adimensionais relevantes na análise dimensional realizada:

$$N_f^2 > 3 \times 10^5 \text{ e } E_0 > 70$$

onde

$$N_f = \frac{g^{1/2} D^{1/3} \rho}{\mu} \quad (2.4)$$

Número de Eötvos, E_0 :

$$E_0 = \frac{\rho g D^2}{\sigma} \quad (2.5)$$

g – aceleração da gravidade

μ – Viscosidade dinâmica do líquido

ρ – Massa volúmica do líquido

σ – Tensão superficial do líquido

Quando as forças viscosas e/ou interfaciais também influenciam a velocidade de subida das bolhas tubulares então o valor de α terá que ser determinado pelas correlações apresentadas sob a forma gráfica por aqueles autores.

Estudos realizados por Nicklin *et al* (1962) e Collins (1978) concluíram que a velocidade do líquido posterior ao “nariz” da bolha do eixo da coluna, v_C , é função da velocidade superficial do líquido, v_L , e do tipo de regime de escoamento no líquido, definido a partir do coeficiente c :

$$v_C = cv_L \quad (2.6)$$

Substituindo a equação (2.3) e (2.6) na equação (2.1) obtém-se

$$v_S = cv_L + \alpha\sqrt{gD} \quad (2.7)$$

Se por sua vez v_L for substituída pela equação (2.2) surge

$$v_S = c \frac{Q_G + Q_L}{A_C} + \alpha\sqrt{gD} \quad (2.8)$$

Nicklin *et al* (1962) definiram o valor de c conforme o tipo de regime de escoamento do líquido. Se o regime no líquido em escoamento for turbulento (número de Reynolds no líquido, Re_{vL} superior a 4000), c toma o valor de 1,2. Caso o regime do líquido em escoamento seja laminar (número de Reynolds no líquido, Re_{vL} inferior a 2100), c toma o valor de 2, sendo o número de Reynolds definido por:

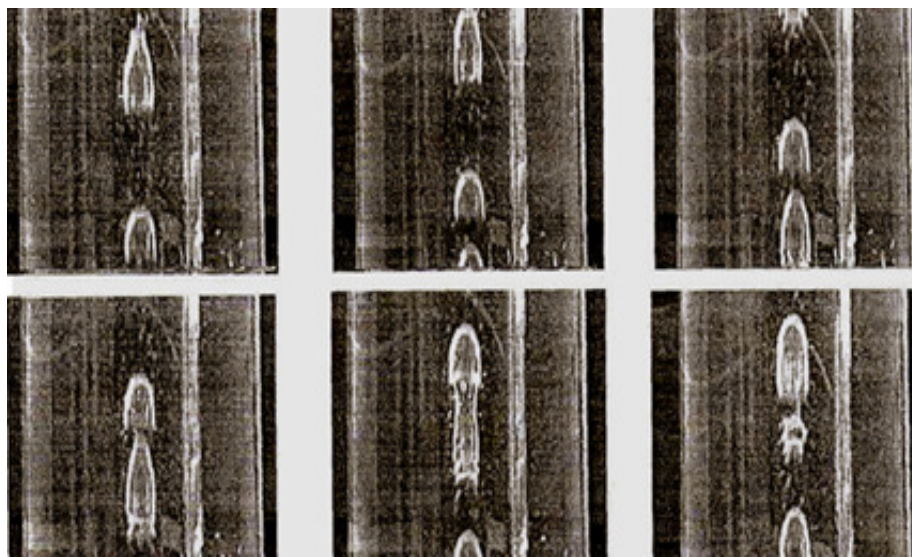
$$Re_{vL} = \frac{\rho v_L D}{\mu} \quad (2.9)$$

2.1.2. Coalescência entre bolhas tubulares

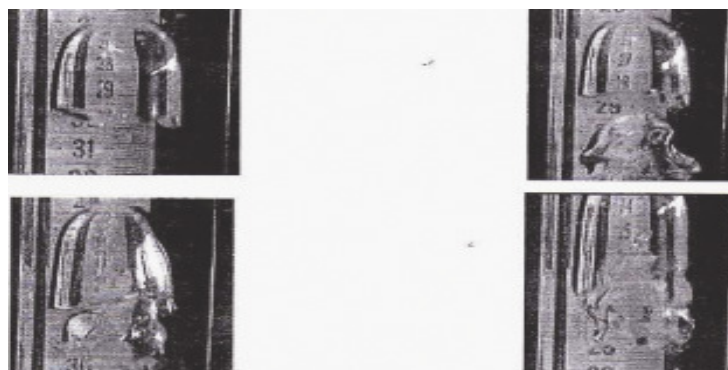
O fenómeno da coalescência entre bolhas tubulares é muito importante, ocorrendo quando duas ou mais bolhas colidem, formando uma única bolha de maior dimensão.

Este facto altera substancialmente a velocidade e frequência das bolhas tubulares, perturbando o desempenho das colunas de recirculação de líquido por borbulhamento.

Podemos verificar isso na figura 2.4, onde podemos ver a coalescência dessas bolhas.



(a)



(b)

Figura 2.4 - Fotografias sequenciais da coalescência entre duas bolhas tubulares (a) plano afastado (b) plano próximo (fotos cedidas por Santos (2004)).

Moissis e Griffith (1962) foram os primeiros a estudar o fenômeno da coalescência entre bolhas e serviram de ponto de partida para estudos posteriores. Foram constatados três aspectos importantes, no que se refere à coalescência entre bolhas tubulares:

- A observação de que a velocidade de uma bolha tubular é afectada pela velocidade do líquido posterior ao “nariz” da mesma;
- O perfil de velocidades do líquido entre duas bolhas tubulares consecutivas é perturbado pela velocidade da bolha da frente;
- a existência de uma distância limite entre bolhas abaixo da qual elas coalescem.

Vários autores referiram ainda que os padrões de escoamento na esteira da bolha influenciam significativamente o fenômeno da coalescência.

Campos e Guedes de Carvalho (1988) concluíram que o comprimento e o tipo de escoamento na esteira, em líquidos estagnados contidos em colunas de diâmetros suficientemente elevados, depende exclusivamente do número adimensional, N_f , definido pela equação 2.4.

Consoante o valor deste número são definidos diferentes tipos de escoamento na esteira:

- I. $N_f < 500$ – regime laminar;
- II. $500 < N_f < 1500$ – regime transitório;
- III. $N_f > 1500$ – regime turbulento.

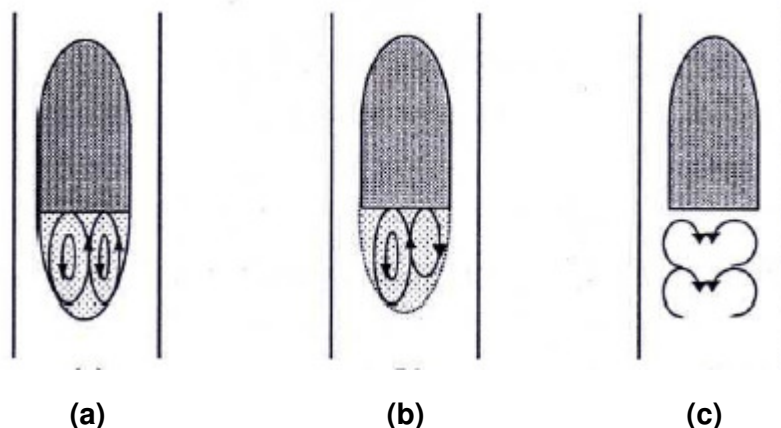


Figura 2.5 - Representação esquemática do comportamento da esteira para os regimes (a) laminar (b) transição (c) turbulento (esquema cedido por Santos (2004)).

Para regime laminar a esteira é fechada, o que significa que o líquido nela contida acompanha o movimento ascendente da bolha. Existe recirculação interna no interior da esteira e a base da bolha ascende sem oscilações. Para regime de transição a esteira continua a ser fechada mas apresenta uma recirculação com oscilação periódica. Para regime turbulento a esteira não apresenta uma fronteira definida sendo assim considerada aberta. Neste caso formam-se turbilhões que se fazem sentir vários diâmetros de coluna abaixo da base da bolha.

Na coluna de borbulhamento vertical com recirculação de líquido em estudo, formam-se bolhas tubulares, resultantes da injeção de gás. Estas bolhas movem-se desde a base até ao topo da coluna de borbulhamento. Este facto ocorre para uma vasta gama de condições de operação e sempre que as pressões sejam mais ou menos constantes.

O líquido, que se encontra entre as bolhas tubulares desloca-se no mesmo sentido destas, mas com velocidades inferiores. Por este motivo, o líquido será “alcançado” pela bolha tubular que o segue, invertendo o sentido de escoamento e deslocando-se para a zona entre a bolha e a parede da coluna.

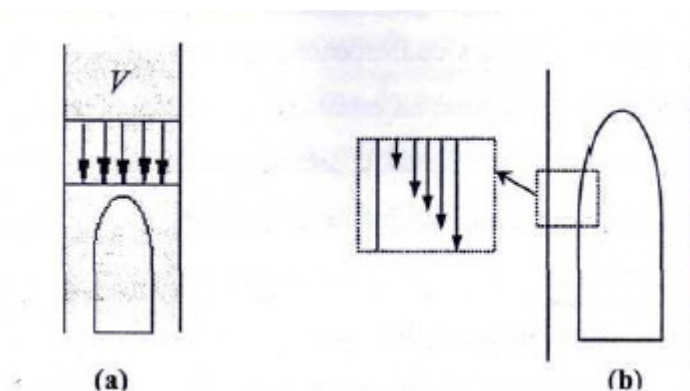


Figura 2.6 - Perfis de velocidade no líquido no interior da coluna num referencial preso à bolha (a) acima do "nariz" da bolha e (b) no filme de líquido entre a bolha e a parede do tubo (esquema cedido por Santos (2004)).

A velocidade média do líquido V , relativamente à bolha, descendente na zona à frente do “nariz” da bolha, mas com perturbação pela ascensão da mesma, será a diferença entre a velocidade de subida das bolhas tubulares, v_s , e a velocidade superficial do líquido em ascensão, v_L . Essa velocidade pode ser calculada e expressa pela equação:

$$V = v_s - v_L = (c - 1) \frac{Q_G + Q_L}{A_c} + \alpha \sqrt{gD} \quad (2.10)$$

O número de Reynolds, para uma velocidade média do líquido, pode ser definido pelas suas propriedades e será calculado pela seguinte expressão:

$$\text{Re}_v = \frac{VD\rho}{\mu} \quad (2.11)$$

Tendo em conta esta expressão foram definidos vários tipos de regime na esteira, Pinto *et al* (1998) ao estudar a subida de duas bolhas tubulares consecutivas através de líquidos escoando em co-corrente, e definido o número de Reynolds de acordo com a equação (2.11). Por comparação com o estudo de Campos e Guedes de Carvalho (1988), concluíram que:

- I. $\text{Re}_v < 175$ – regime laminar;
- II. $175 < \text{Re}_v < 525$ – regime transitório;
- III. $\text{Re}_v > 525$ – regime turbulento.

De acordo ainda com estes estudos referidos, no regime turbulento na esteira e regime turbulento no líquido entre bolhas, o valor da mínima distância estável entre bolhas, para que não ocorra coalescência é de 5D. Em condições de regime laminar no líquido e regime turbulento na esteira, aconteciam dois factos distintos:

- Observava-se que ocorria coalescência quando o quociente entre a velocidade média no filme do líquido e a velocidade superficial do líquido, v_{δ}/v_L , era superior a 25, sendo a distância mínima estável entre bolhas tubulares de aproximadamente 10D;
- Não ocorria coalescência entre as bolhas tubulares ao longo de uma coluna de líquido vertical quando a referida razão era inferior a 25, aumentando a distância entre as bolhas durante a subida.

2.2. Retenção de gás no interior da coluna

A fracção de volume de gás existente no interior da coluna de borbulhamento designa-se por retenção, ϵ . A retenção de gás influencia o regime de escoamento, os coeficientes de transferência de calor e de massa, sendo por isso um dos parâmetros mais importantes no projecto de colunas de borbulhamento com recirculação.

Para podermos calcular a retenção utiliza-se a expressão:

$$\varepsilon = \frac{Q_G}{A_C \times v_s} \quad (2.12)$$

onde Q_G representa o caudal de gás injectado, A_C a área da secção recta da coluna de borbulhamento e v_s a velocidade das bolhas tubulares.

Outro parâmetro que pode ser calculado de modo a poder ser feita a comparação com os valores calculados por *Nicklin et al* (1962) é o parâmetro experimental C_{exp}

$$C_{\text{exp}} = \frac{\frac{Q_G}{\varepsilon \times A_C} - \alpha \sqrt{gD}}{v_L} \quad (2.13)$$

que se obtém substituindo a equação (2.7) na equação (2.12) e onde tanto para a retenção como para a velocidade superficial do líquido são usados os valores experimentais.

3. DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

A coluna de borbulhamento estudada neste trabalho foi do tipo CREL – coluna de recirculação externa do líquido. Neste sistema de recirculação de líquido, constituído por duas colunas ligadas na base e no topo, ar é continuamente injectado na base da coluna de borbulhamento formando-se bolhas tubulares, para as condições de operação usadas neste estudo. Estas bolhas ascendem juntamente com o líquido até ao topo da coluna onde se encontra uma caixa colectora que permite separar a mistura gás-líquido. Nesta caixa o ar liberta-se para o exterior e o líquido é reencaminhado para a coluna externa onde inicia o seu movimento descendente, recirculando para a coluna de borbulhamento.

Na constituição do tipo de colunas que serão utilizadas (CREL), podemos observar a existência:

- ✓ injector de ar – fornece ar na base da coluna. Este ar introduzido na base da coluna provoca a formação de bolhas, que fazem o mesmo movimento ascendente do líquido até ao topo da coluna. Ao chegar ao topo da coluna, a mistura gás-líquido é separada e o líquido é recolhido numa caixa colectora. Neste ponto, o ar é libertado para o exterior e o líquido é reencaminhado para o tubo externo, onde inicia o seu movimento descendente.
- ✓ Duas colunas ligadas na base e no topo, sendo que a recirculação das soluções ocorre na coluna externa à de borbulhamento.
- ✓ A coluna de 22 mm possui uma altura de 272,60 cm e a coluna de 32 mm tem uma altura de 274,50 cm.

As experiências realizadas, no decurso do trabalho, tiveram como objectivo analisar o comportamento hidrodinâmico das soluções com para uma vasta gama de viscosidades do líquido (0,007 até 0,522 Pa.s), caudais de gás ($1,50 \times 10^{-5}$ até $1,35 \times 10^{-4}$ m³/s) injectados na coluna e também com dois diâmetros de coluna diferentes (22 e 32 mm). Todas estas experiências foram realizadas para uma razão de submersão de 0,85. Estas condições permitiram obter diferentes regimes de escoamento do líquido e da esteira das bolhas tubulares em ascensão no tubo central, tendo sido determinados os seguintes parâmetros:

- Retenção de gás no interior da coluna;
- Caudal de líquido em escoamento.

De referir que no laboratório onde se realizaram as experiências existia um aparelho de ar condicionado que permitiu controlar e manter a temperatura ambiente aproximadamente constante.

3.1. Caracterização dos fluidos

Estudou-se um sistema bifásico gás líquido. O gás utilizado foi ar comprimido proveniente de um compressor. Para a fase líquida usaram-se soluções aquosas de glicerina com diferentes concentrações. Na tabela 3.1 apresentam-se propriedades físicas das soluções de glicerina, de acordo com as temperaturas a que se realizaram os ensaios, em cada uma das colunas de borbulhamento, de diâmetros de 22 mm e 32 mm. A concentração da glicerina foi calculada através da determinação da viscosidade no viscosímetro à uma temperatura medida por um termopar.

Tabela 3.1 - Propriedades físicas das soluções aquosas de glicerina para os diferentes ensaios realizados.

Ensaio	D(mm)	% p/p glicerina	T(°C)	ρ (kg/m ³)	μ (Pa.s)
1	22	97,52	26,81±0,11	1250	0,529
		97,51	26,93±0,04	1250	0,522
		96,70	25,22±0,06	1249	0,514
		96,56	24,84±0,02	1249	0,515
		96,42	24,42±0,02	1249	0,516
		96,35	24,01±0,17	1249	0,524
2	32	95,76	22,10±0,05	1249	0,531
		95,61	22,26±0,05	1248	0,512
		95,42	21,45±0,05	1248	0,520
		95,40	21,11±0,03	1249	0,529
		95,34	21,53±0,13	1248	0,511
		95,11	20,59±0,07	1248	0,517
3	22	90,49	18,83±0,12	1235	0,274
4	32	90,64	18,95±0,05	1234	0,278
5	22	80,12	19,15±0,11	1209	0,066
6	32	80,34	19,76±0,15	1210	0,065
7	22	80,41	23,84±0,12	1207	0,053
8	32	80,34	24,03±0,20	1207	0,052
9	22	52,65	21,16±0,22	1133	0,007
10	32	53,49	22,02±0,12	1135	0,007

A concentração da solução foi calculada pela determinação da viscosidade num viscosímetro de Brookfield no caso das soluções com viscosidade entre 0,052 Pa.s e 0,522 Pa.s e num viscosímetro de queda de bola de Haake no caso da solução com viscosidade de 0,007 Pa.s. Utilizando o artigo de Segur e Oberstar (1951) determinava-se a concentração.

Conhecendo a concentração da solução era imposto um intervalo máximo de variação de temperatura de modo a que a variação da viscosidade não fosse superior a 2,5 % do valor da viscosidade a analisar.

Os valores máximos e mínimos da temperatura eram determinados de modo a que o valor da viscosidade situa-se dentro do intervalo de variação imposto. Para determinar essas temperaturas utilizava-se o artigo publicado por Segur e Oberstar (1951).

A temperatura era medida durante a realização dos ensaios. A temperatura da tabela 3.1 é a média dos ensaios realizados para cada posição de gás injectado na coluna.

Os valores da massa volúmica eram calculados utilizando tabelas da bibliografia à temperatura média da realização dos ensaios.

Para os ensaios 1 e 2, onde se usou a solução aquosa de glicerina com maior viscosidade (0,511 - 0,531 Pa.s), verificou-se que ao longo da experiência a solução aquosa de glicerina absorvia humidade presente no ar ambiente diminuindo o valor da sua concentração em cerca de 1%, conforme se pode observar na tabela 3.1. De forma a evitar que esta diminuição afectasse a viscosidade, optou-se por determinar a viscosidade após a experiência com cada caudal de gás injectado e alterar a temperatura ambiente, caso fosse necessário, de forma a manter a viscosidade aproximadamente constante.

Para os restantes ensaios a solução aquosa de glicerina não se revelou tão higroscópica tendo-se verificado que a variação da concentração em glicerina não era significativa entre o início e o fim do ensaio.

Salienta-se que apesar de ter sido possível controlar a temperatura ambiente, por intermédio de um aparelho de ar condicionado, houve sempre uma pequena variação da temperatura. Na tabela 3.1 indicam-se os valores médios da temperatura bem como o desvio padrão.

A instalação usada por Rangel (2008), foi a instalação usada neste trabalho tendo no entanto sido alterada de forma a permitir que o trabalho experimental desenvolvido neste estudo pudesse ser executado por apenas uma pessoa, pequena plataforma de modo a ser possível pousar o recipiente de recolha do líquido enquanto apenas uma pessoa podia operar o sistema de calhas e o cronómetro, ao mesmo tempo. Isto permitiu planear as experiências com mais autonomia o que possibilitou a realização de ensaios em dias consecutivos, com temperaturas e viscosidades muito semelhantes.

3.2. Procedimento experimental e esquema da instalação

Na figura 3.1 é representado o diagrama da instalação experimental

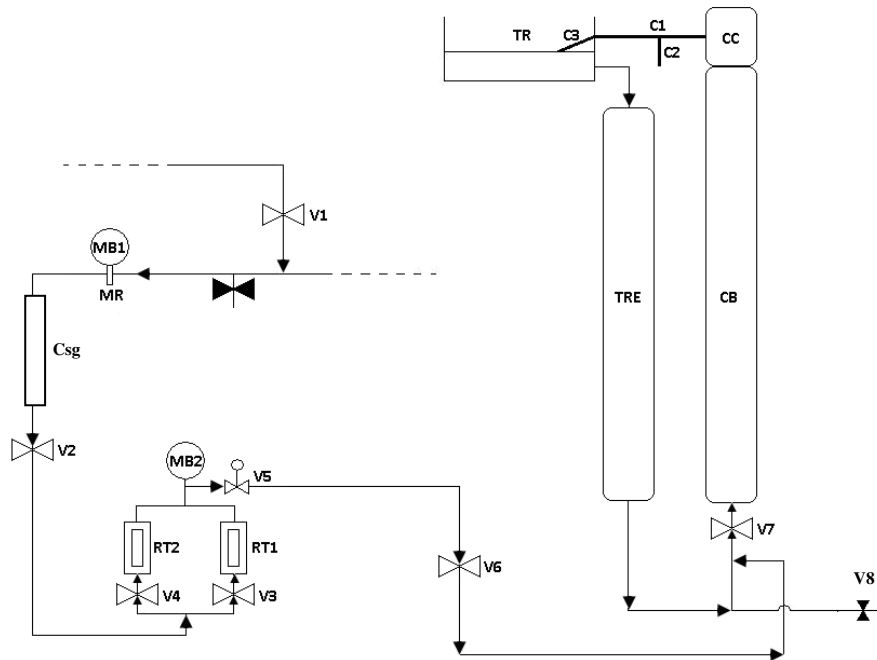


Figura 3.1 - Diagrama da instalação experimental (esquema cedido por Pereira *et al.* (2007)).

CB – Coluna de borbulhamento

CC - Caixa colectora

Csg – coluna com sílica gel

C1/C2/C3 – Calhas metálicas

MB1/MB2 - Manómetros de Bourdon

MR - Manodredutor com filtro

RT1/RT2-Rotâmetros

TR - Tanque de Recolha

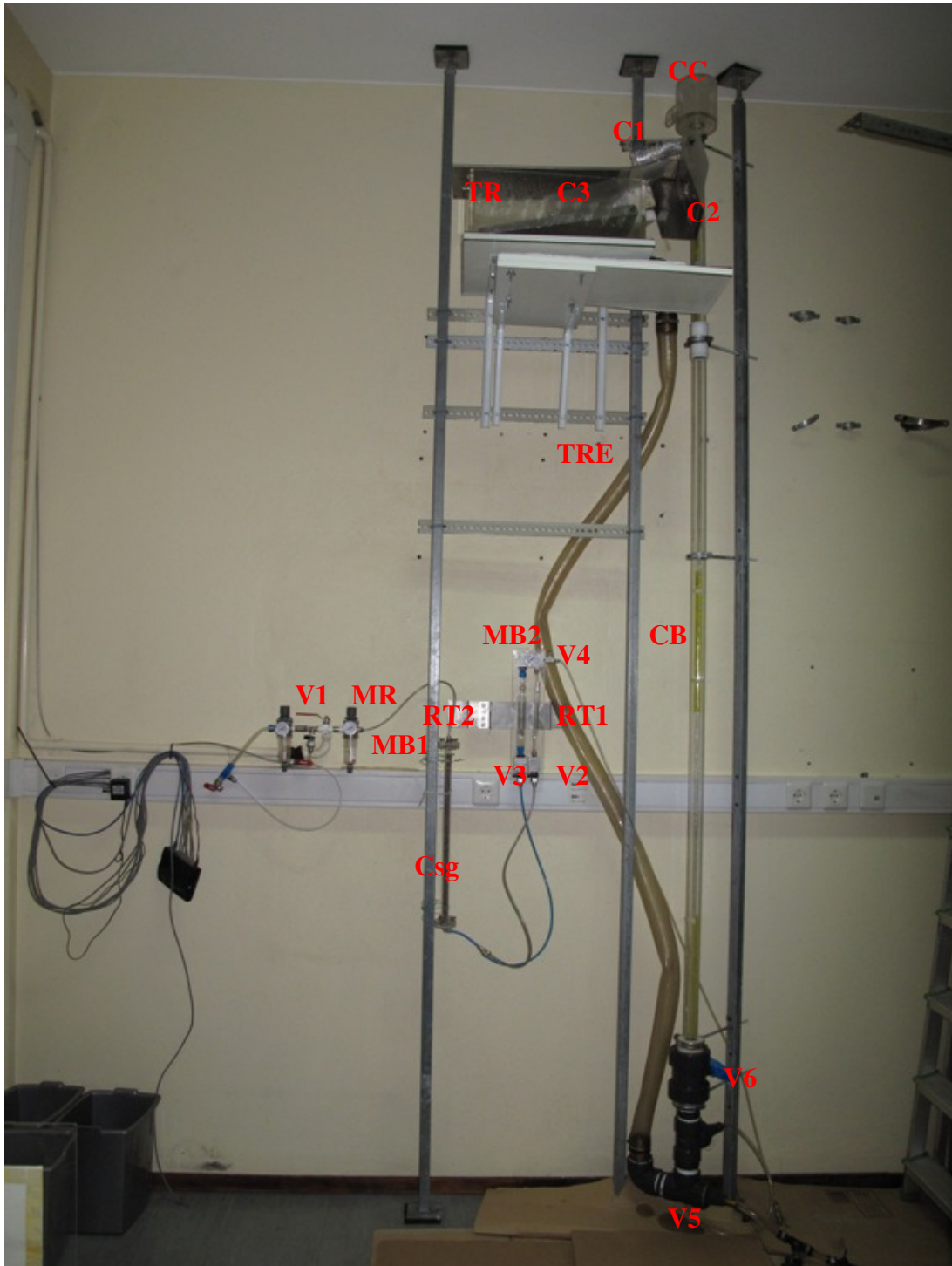
TRE - Tubo de recirculação externa

V1,V2,V3,V4,V6,V7 e V8 - Válvulas de macho esférico

V5 - Válvula de agulha

3.2.1. Procedimento de arranque da instalação

A instalação utilizada no decurso do presente trabalho para determinação dos diferentes parâmetros que caracterizam a hidrodinâmica da coluna de recirculação externa de líquido (CREL) é apresentada na figura 3.2.



Legenda da instalação

CB – Coluna de borbulhamento

CC – Caixa colectora

C1,C2,C3 – Calhas metálicas

Csg – Coluna de sílica gel

MB1 e MB2 – Manómetros de Bourdon

V1,V2,V3, V5 e V6 – Válvulas de macho esféricas

V4 - Válvula de agulha

RT1 e RT2 – Rotâmetros

TR – Tanque de recolha

TRE - Tubo de recirculação exterior

MR - Manoreductor com filtro

Figura 3.2 – Vista geral da instalação experimental.

O arranque do funcionamento da instalação foi feito da mesma forma para todos os ensaios realizados.

As soluções aquosas de glicerina, contidas em bidões de 5 litros, foram transferidas directa e manualmente para o tanque de recolha TR procedendo-se assim ao enchimento da instalação de uma forma que evitou a formação de pequenas bolhas. A solução era introduzida na instalação até se verificar que o respectivo nível atingia 85% da altura da coluna de borbulhamento (L_c), sendo este nível marcado no tanque de recolha.

A pressão do ar injectado na coluna era regulada para 1,2 a 1,3 bar (pressão relativa), no manoredutor com filtro, MR, de forma a assegurar uma pressão de 1 bar (pressão relativa) no manómetro de Bourdon MB2, colocado à saída dos rotâmetros RT1 e RT2. De seguida, abria-se a válvula de macho esférica, V2 ou V3, conforme se pretendia usar, respectivamente, o rotâmetro RT1, para a gama de caudais mais baixa, ou o rotâmetro RT2, para o caudal mais elevado. A abertura das válvulas V5 e V6 permitia a entrada de ar na base da coluna. O ajuste do caudal de gás para o valor pretendido (determinada pela posição do topo do flutuador no rotâmetro) era feito com a válvula de agulha, V4. Na figura 3.3 está representado o sistema de regulação de ar e os manómetros utilizados para medição do caudal.

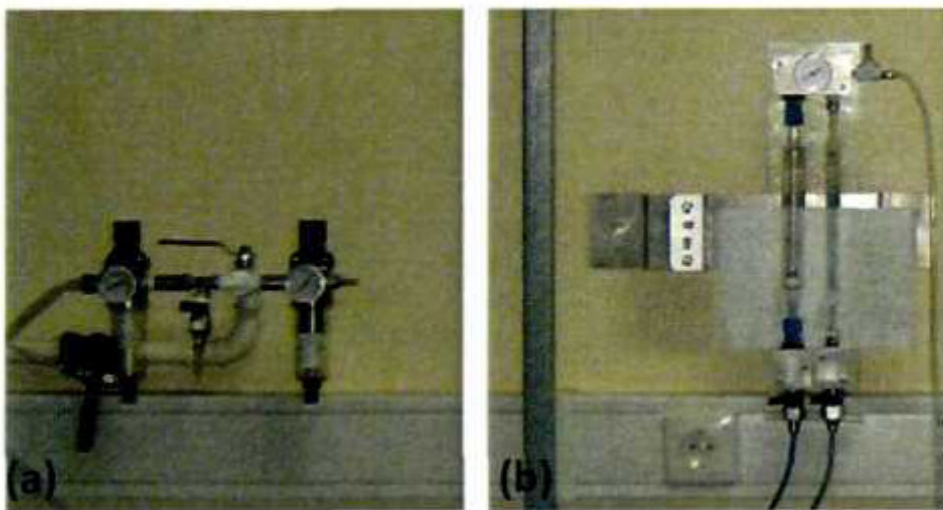


Figura 3.3 - Sistema de regulação do caudal de ar(a) Par de rotâmetros utilizados (b) (Fotos cedidas por Pereira *et al.*(2007)).

Será de salientar que na linha de ar existia uma coluna com sílica gel, Csg, que permitia retirar a humidade do ar a ser injectado na instalação experimental. Procurou-se desta forma reduzir a diluição das soluções aquosas de glicerina com a água presente no ar vindo do compressor.

Com as condições de operação estabelecidas, iniciava-se a ascensão das bolhas tubulares ao longo da coluna de borbulhamento, CB, e a recirculação do líquido. Atingida a caixa colectora (figura 3.6), CC, as bolhas tubulares separam-se do líquido libertando-se para a atmosfera, e o líquido passa para o tanque de retenção, TR, através das calhas C1 e C2. No tanque de retenção o líquido passa ainda por uma outra calha, C3, que serve para diminuir a velocidade do líquido e assim fazer com que as soluções aquosas de glicerina libertem as bolhas de ar de menor dimensão, formadas na zona de injeção de ar e que não coalesceram.

Do tanque de recolha, TR, o líquido sai para o tubo de recirculação externo, TRE, que transporta o líquido novamente até à coluna de borbulhamento.

A temperatura da solução aquosa de glicerina utilizada nas experiências era medida no tanque de recolha em contínuo com auxílio de um termómetro digital com sonda de temperatura (termopar). Este procedimento permitia verificar se a temperatura, e consequentemente a viscosidade, se mantinham constantes durante cada ensaio.

Periodicamente ao longo das experiências verificava-se o nível de líquido na coluna, aferindo-o sempre que necessário, para que a razão de submersão, β , se mantivesse constante.

3.2.2. Procedimento para determinação do caudal volumétrico de Líquido

Após o início da circulação do líquido na coluna, e após esperar o tempo necessário para se atingir o estado estacionário, iniciava-se a determinação do caudal volumétrico, Q_L . Utilizando um recipiente de 2L, previamente tarado na balança, cronometrava-se o tempo necessário para a recolha de uma determinada quantidade de líquido. A quantidade recolhida situava-se entre 650ml e 850 ml, correspondente a uma massa situada entre 780 e 1100g.

A recolha do líquido era feita por alteração da posição das calhas existentes. A calha C1 por ser móvel permitia alterar o sentido de escoamento do líquido passando este a escorrer para a calha C2, e desta para o recipiente de recolha, iniciando-se a contagem do tempo. Uma vez recolhido o volume de líquido pretendido, a calha C1 voltava à posição inicial, alterando-se novamente o sentido de escoamento para o tanque ao mesmo tempo que se parava a cronometragem do tempo.

A quantidade recolhida de solução aquosa de glicerina era pesada numa balança de prato. Com este valor e o tempo de recolha determinava-se o caudal mássico em circulação que por sua vez era convertido em caudal volumétrico usando a massa volúmica da solução. A balança utilizada é representada na figura 3.4.



Figura 3.4 - Balança de prato OHAUS (grupo Pioneer TM), carga máxima 4200g e 0,01g de precisão.

A solução era recolocada no tanque, esperando entre 5 a 10 minutos para que a circulação estabilizasse em estado estacionário. Repetia-se o procedimento até se conseguir 10 valores para o caudal que não tivessem uma diferença maior que 5% em relação ao valor médio.

O caudal volumétrico do líquido juntamente com o caudal de gás injectado permitia calcular a velocidade do líquido em circulação na coluna de borbulhamento de acordo com a equação (2.2).

De salientar que apenas são apresentados resultados relativamente às experiências em que o caudal de gás injectado permitia obter um caudal de líquido contínuo em circulação da coluna de borbulhamento para o tanque de recolha.

3.2.3. Procedimento para determinação da retenção

Após arranque da instalação e para cada caudal de gás, deixava-se circular a solução por um determinado tempo de modo a conseguir-se a estabilização do escoamento da solução. Após esta estabilização, a injeção de gás era interrompida, fechando-se a válvula V6, e deixava-se o gás separar do líquido. Era necessário aguardar algum tempo, no mínimo 20 minutos, para que o líquido na parede do topo da coluna escorresse e o nível de líquido estabilizasse. Media-se a altura da coluna acima do nível de líquido com uma fita métrica existente na coluna. Repetia-se este procedimento até se conseguir cinco valores que não tivessem uma diferença maior que 5% em relação ao valor médio. O valor medido correspondia ao valor da altura que o gás ocupava durante o borbulhamento. Dividindo este valor pela altura da coluna (medido desde o ponto de injeção de gás) determinava-se o valor da retenção.

$$\varepsilon = \frac{\text{Altura acima do nível de líquido (no ensaio)}}{\text{Altura total da coluna}}$$

3.2.4. Procedimento para determinação da viscosidade

Para determinação da viscosidade das soluções utilizava-se o viscosímetro de Brookfield e o sistema de refrigeração representados pela figura 3.5.



Figura 3.5 - Viscosímetro de Brookfield – Model DVII+ (a) com sistema de refrigeração/aquecimento (b) (fotos cedidas por Pereira *et al* (2007)).

O sistema de refrigeração/aquecimento do viscosímetro de Brookfield era ligado e a temperatura era definida. Ligava-se o viscosímetro e aguardava-se a estabilização do banho. Colocava-se a amostra da solução a analisar no recipiente cilíndrico do viscosímetro, fazendo variar as rotações até um valor estável da viscosidade. Com um termopar media-se a temperatura do líquido no cilindro sendo de referir que nunca se conseguiu que esta fosse igual à imposta no banho.

Repetia-se o procedimento de medição da viscosidade cinco vezes para cada amostra havendo o cuidado de proceder à limpeza do viscosímetro entre análises, de modo a não haver contaminação entre amostras subsequentes.

Com esta determinação da viscosidade era possível determinar a concentração das soluções aquosas de glicerina através dos do artigo publicado por Segur J.B. e Oberstar H.E. (1951). Com o valor da concentração era possível determinar a temperatura da solução para que a viscosidade tivesse o valor para o qual estavam a ser determinados os parâmetros hidrodinâmicos da coluna. Para isso utilizava-se novamente o artigo referido anteriormente.

Para a solução menos viscosa utilizava-se o viscosímetro de queda de bola de Haake representado na figura 3.6.

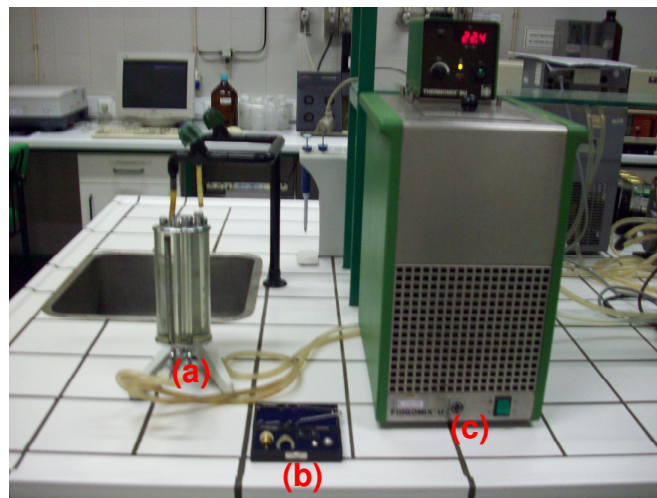


Figura 3.6 - Viscosímetro de Queda de bola da marca Haake Viscosimetres (a) com acessórios (b) e com sistema de refrigeração/aquecimento (c).

Neste viscosímetro era determinado o tempo necessário para escoamento de uma esfera metálica entre dois pontos marcados no viscosímetro. Com este valor e com as características da esfera dadas pelo fabricante era possível calcular a viscosidade da solução por uma expressão dada pelo fabricante no manual de utilização do viscosímetro.

4. RESULTADOS

Um dos parâmetros importantes na caracterização hidrodinâmica de colunas com recirculação por borbulhamento na coluna interna é a retenção do gás na coluna, visto induzir a força directriz para essa recirculação. Inicialmente serão apresentados, neste trabalho, os resultados relativos a este parâmetro.

No estudo realizado foram utilizadas duas colunas com diferentes diâmetros (22 mm e 32 mm), soluções aquosas de glicerina com diferentes concentrações, tendo-se variado o caudal de gás injectado, de modo a obter diferentes regimes de escoamento na esteira das bolhas tubulares e no líquido em escoamento na coluna de borbulhamento. Esses regimes eram determinados de acordo com os valores apresentados na tabela 4.1 As experiências permitiram assim obter diferentes combinações dos números adimensionais, Re_{v_L} e Re_V

Tabela 4.1 - Intervalos para os números de Reynolds, Re_{v_L} e Re_V , correspondente a diferentes regimes de escoamento no líquido e na esteira.

Regime	Re_{v_L}	Re_V
Laminar	< 2100	< 175
Transição	2100 – 4000	175 – 525
Turbulento	> 4000	> 525

A velocidade média experimental do líquido em escoamento no interior da coluna de borbulhamento foi determinada em todos os ensaios efectuados sendo posteriormente apresentada e comparada com os valores previstos por Nicklin *et al.* (1962).

Os valores da retenção de gás e velocidade superficial no interior da coluna de borbulhamento foram comparados com os valores experimentais obtidos nos trabalhos de Santos (2004) e Santos (2005) onde foi usada uma razão de submersão de 0,935 e também com os resultados obtidos por Rangel (2008) que usou nas respectivas experiências uma razão de submersão de 0,91.

4.1. Retenção de gás na coluna de borbulhamento

Nas figuras 4.1 a 4.10, comparam-se os valores experimentais da retenção do gás com os previstos pela equação 2.12. O valor de v_s nesta equação foi calculado pela equação 2.7 com α previsto por White e Beardmore (1962), c igual a 1,2 para regime turbulento e c igual a 2,0 para regime laminar.

Esta determinação foi feita para as duas colunas de borbulhamento (22 e 32 mm), em função da velocidade de líquido em circulação, v_L , calculado pela expressão 2.2 com os valores experimentais do caudal de gás e de líquido em circulação no interior da coluna. A cada um dos valores é associada uma incerteza apresentada no Apêndice B.

A seguir a cada uma das figuras é apresentada uma tabela com os valores experimentais do número de Reynolds no líquido em escoamento entre bolhas tubulares, Re_{v_L} , e na esteira, Re_v , e os valores da constante c experimental calculados a partir da expressão 2.13.

Nas figuras 4.1 a 4.4 e tabelas 4.2 a 4.6 são apresentados os resultados obtidos nas colunas com 22 mm e 32 mm de diâmetro interno para as soluções aquosas de glicerina com viscosidades mais elevadas. Nestas condições a velocidade das bolhas é independente das forças interfaciais mas é dominada por forças viscosas e inerciais. Os valores do coeficiente α , determinado segundo White e Beardmore (1962), são nestas condições diferentes de 0,345 conforme se pode observar pelos valores apresentados nos títulos das tabelas 4.2 a 4.6.

Ensaio 1

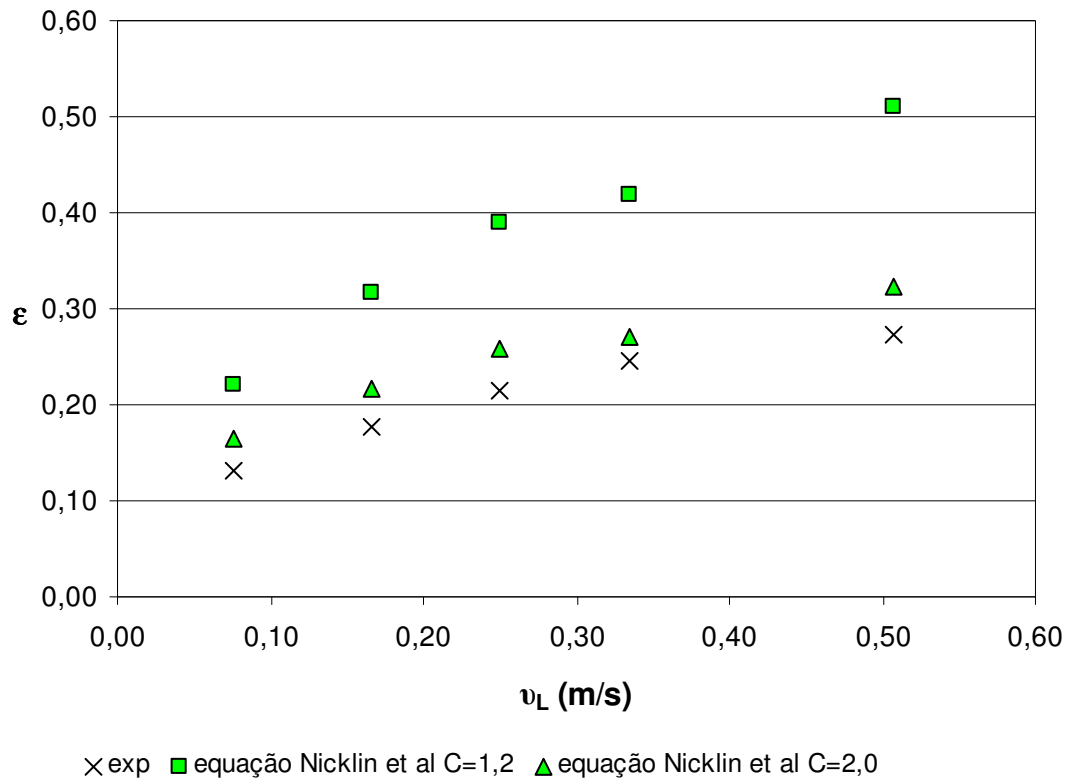
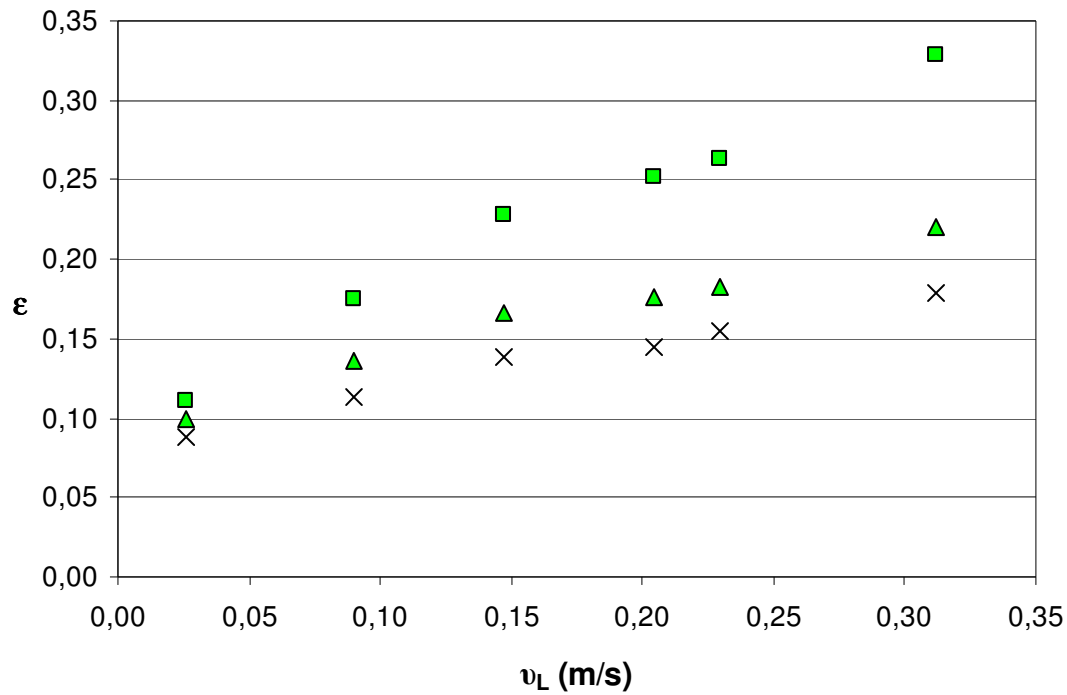


Figura 4.1 - Comparação entre os valores experimentais da retenção e os valores previstos pela equação de Nicklin, usando uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,520$ Pa.s ($\pm 0,006$) e $\rho = 1250$ kg/m³ ($\pm 0,6$) na coluna de 22 mm de diâmetro interno.

Tabela 4.2 - Valores experimentais da constante C_{exp} , dos números de Reynolds no líquido (Re_{vL}) e na esteira (Re_v) em função da velocidade média do líquido (v_L), com $\alpha = 0,188$ para uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,520$ Pa.s ($\pm 0,006$) e $\rho = 1250$ kg/m³ ($\pm 0,6$) na coluna de 22 mm de diâmetro interno.

Q_G (m ³ /s)	v_L (m/s)	Re_{vL}	Re_v	C_{exp}
$1,50 \times 10^{-5}$	0,076	4,1	12,1	2,8
$3,45 \times 10^{-5}$	0,166	8,7	18,5	2,6
$5,75 \times 10^{-5}$	0,250	13,4	24,3	2,5
$7,75 \times 10^{-5}$	0,334	17,8	26,6	2,2
$1,35 \times 10^{-4}$	0,507	26,6	41,8	2,4

Ensaio 2



× exp ■ Equação Nicklin et al C=1,2 ▲ Equação Nicklin et al C=2,0

Figura 4.2 - Comparação entre os valores experimentais da retenção e os valores previstos pela equação de Nicklin, usando uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,520$ Pa.s ($\pm 0,008$) e $\rho = 1248$ kg/m³ ($\pm 0,3$) na coluna de 32 mm de diâmetro interno.

Tabela 4.3 - Valores experimentais da constante C_{exp} , dos números de Reynolds no líquido (Re_{v_L}) e na esteira (Re_v) em função da velocidade média do líquido (v_L), com $\alpha = 0,245$ para uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,520$ Pa.s ($\pm 0,008$) e $\rho = 1248$ kg/m³ ($\pm 0,3$) na coluna de 32 mm de diâmetro interno.

Q_G (m ³ /s)	v_L (m/s)	Re_{v_L}	Re_v	C_{exp}
$1,50 \times 10^{-5}$	0,026	1,9	14,0	2,9
$3,45 \times 10^{-5}$	0,090	7,0	22,6	2,7
$5,75 \times 10^{-5}$	0,147	11,3	28,4	2,6
$7,75 \times 10^{-5}$	0,204	15,4	35,0	2,6
$8,75 \times 10^{-4}$	0,230	18,0	37,0	2,5
$1,35 \times 10^{-4}$	0,312	24,1	48,4	2,6

Ensaio 3

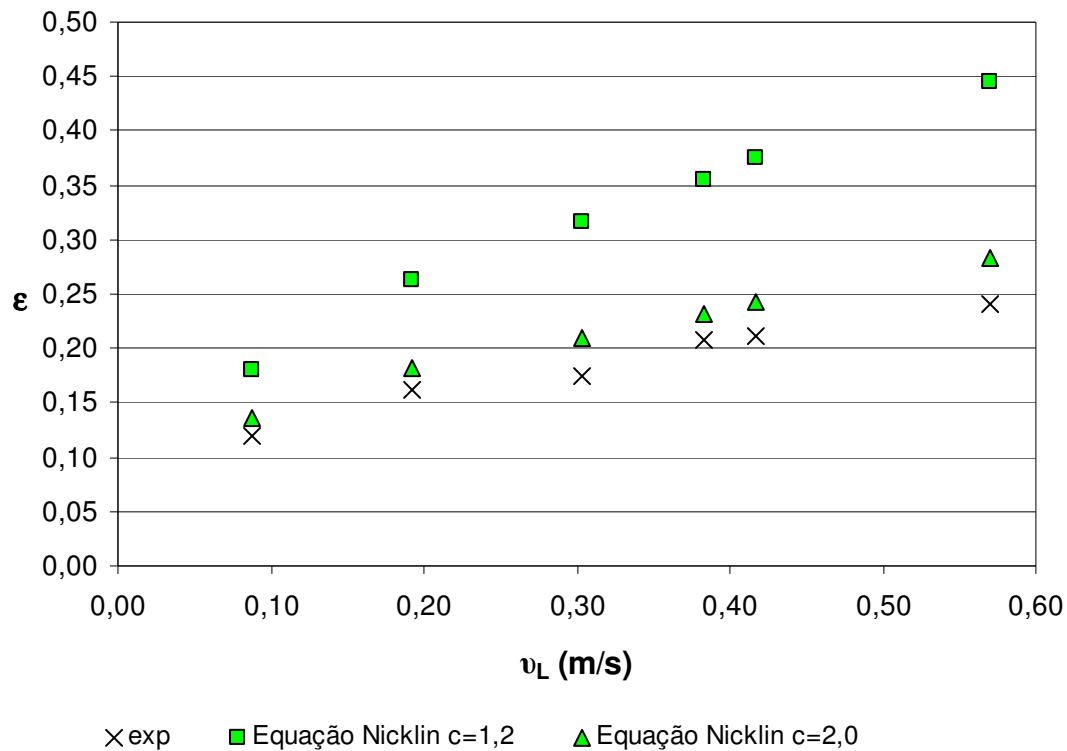


Figura 4.3 - Comparação entre os valores experimentais da retenção e os valores previstos pela equação de Nicklin, usando uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,274$ Pa.s ($\pm 0,004$) e $\rho = 1234$ kg/m³ ($\pm 0,1$) na coluna de 22 mm de diâmetro interno.

Tabela 4.4 - Valores experimentais da constante C_{exp} , dos números de Reynolds no líquido (Re_{vL}) e na esteira (Re_v) em função da velocidade média do líquido (v_L), com $\alpha = 0,245$ para uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,274$ ($\pm 0,004$) e $\rho = 1235$ kg/m³ ($\pm 0,1$) na coluna de 22 mm de diâmetro interno.

Q_G (m ³ /s)	v_L (m/s)	Re_{vL}	Re_v	C_{exp}
$1,50 \times 10^{-5}$	0,087	8,8	24,6	2,5
$3,45 \times 10^{-5}$	0,192	19,3	36,9	2,3
$5,75 \times 10^{-5}$	0,303	29,6	54,6	2,5
$7,75 \times 10^{-5}$	0,383	37,7	59,1	2,3
$8,75 \times 10^{-4}$	0,417	40,7	65,9	2,4
$1,35 \times 10^{-4}$	0,569	56,6	90,5	2,4

Ensaio 4

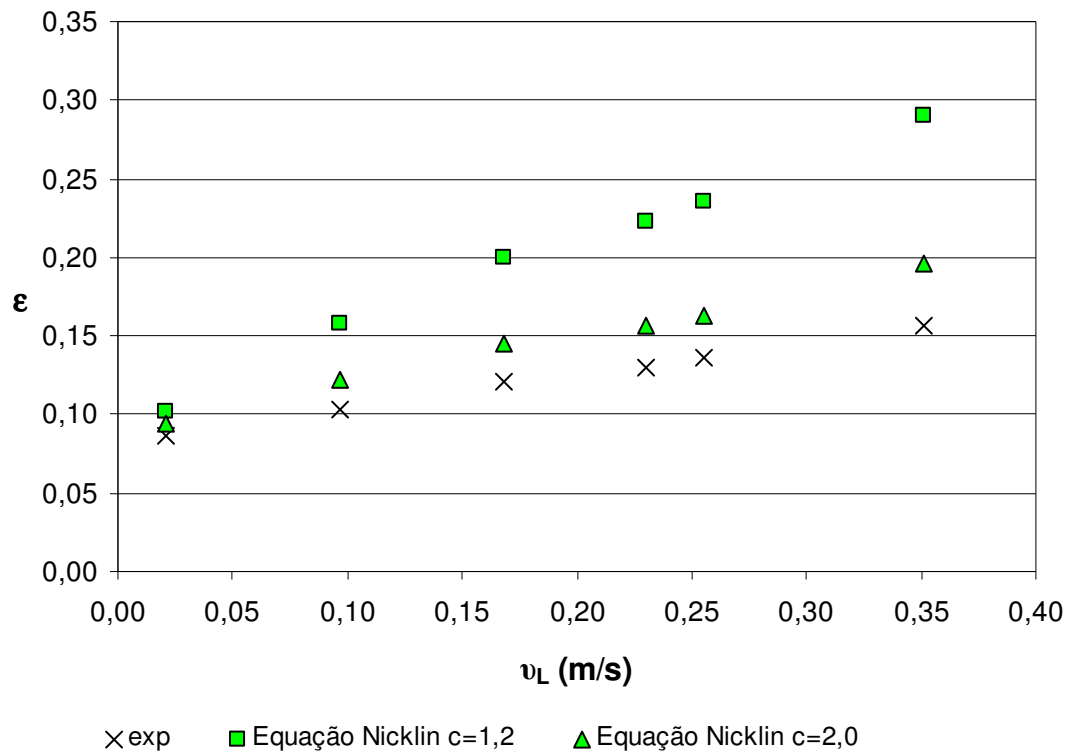


Figura 4.4 - Comparação entre os valores experimentais da retenção e os valores previstos pela equação de Nicklin, usando uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,278$ Pa.s ($\pm 0,002$) e $\rho = 1248$ kg/m³ ($\pm 0,5$) na coluna de 32 mm de diâmetro interno.

Tabela 4.5 - Valores experimentais da constante C_{exp} , dos números de Reynolds no líquido (Re_{vL}) e na esteira (Re_v) em função da velocidade média do líquido (v_L), com $\alpha = 0,280$ para uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,278$ Pa.s ($\pm 0,002$) e $\rho = 1237$ kg/m³ ($\pm 0,1$) na coluna de 32 mm de diâmetro interno.

Q_G (m ³ /s)	v_L (m/s)	Re_{vL}	Re_v	C_{exp}
$1,50 \times 10^{-5}$	0,021	3,0	27,6	2,8
$3,45 \times 10^{-5}$	0,097	13,7	45,7	2,7
$5,75 \times 10^{-5}$	0,168	24,0	60,8	2,6
$7,75 \times 10^{-5}$	0,230	32,7	72,4	2,5
$8,75 \times 10^{-4}$	0,255	36,6	77,5	2,5
$1,35 \times 10^{-4}$	0,351	50,6	103,5	2,6

Para as experiências apresentadas nas figuras anteriores (4.1 a 4.4) verifica-se que o regime de escoamento é laminar no líquido entre bolhas e igualmente laminar na esteira das bolhas tubulares, como se pode constatar pelos valores de Re_{vL} e Re_v apresentados nas tabelas 4.1 a 4.4.

Os valores obtidos para a retenção experimental são inferiores aos valores teóricos obtidos para $c=2$. Isto implica que se obtenham valores para a constante c experimental superiores a 2. Será de salientar que Santos (2004) refere valores de c da ordem de 2,5 para soluções muito viscosas, assim como Collins *et al*, (1978) e Fréchou, (1986) que referem valores de c da ordem de 2,3.

Este facto indicia que para soluções com viscosidades elevadas as bolhas tubulares deverão ter uma velocidade superior à prevista teoricamente pelo que a retenção deverá ser menor.

Nas figuras 4.5 a 4.8 e tabelas 4.5 a 4.8 apresentam-se os resultados relativos a soluções aquosas de glicerina com viscosidades menores (0,066 Pa.s a 053 Pa.s) nas colunas com 22 mm e 32 mm de diâmetro interno. Nestas condições a velocidade de subida das bolhas tubulares é ainda dominada pelas forças viscosas e inerciais e independente das forças interfaciais segundo White e Beardmore (1962).

Os números de Reynolds calculados indicam que o escoamento no líquido entre bolhas é laminar e o escoamento na esteira das bolhas é, quase na totalidade, de transição.

Ensaio 5

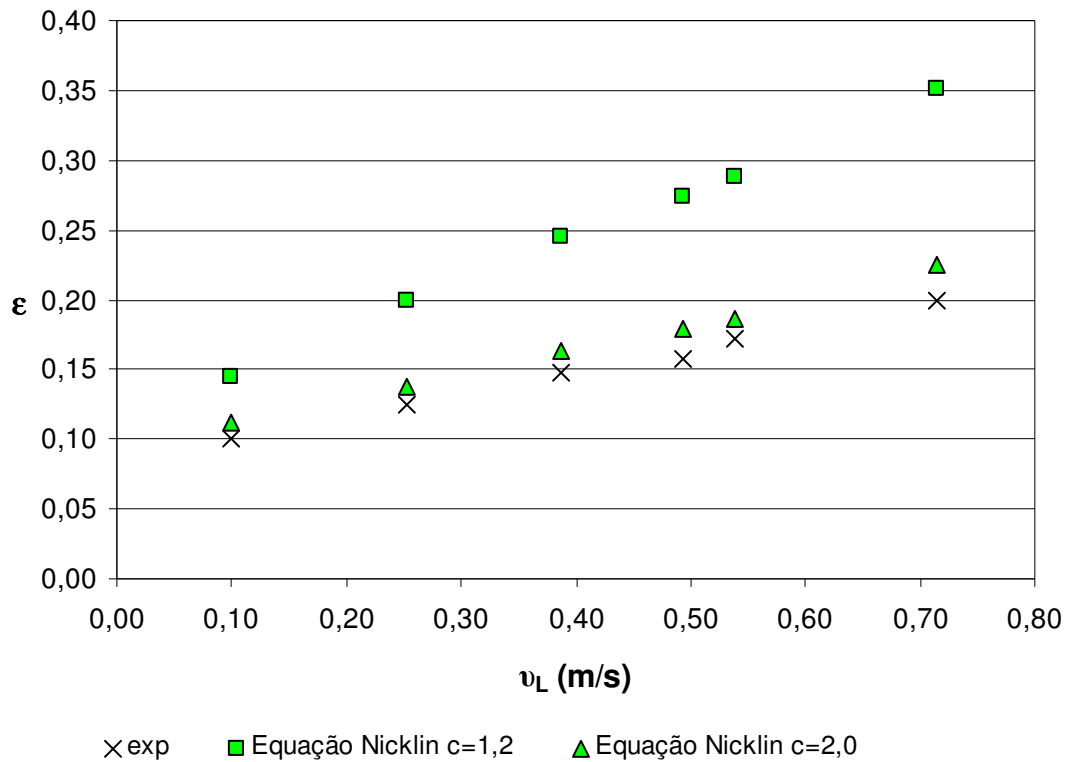


Figura 4.5 - Comparação entre os valores experimentais da retenção e os valores previstos pela equação de Nicklin, usando uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,066$ Pa.s ($\pm 0,001$) e $\rho = 1209$ kg/m³ ($\pm 0,1$) na coluna de 22 mm de diâmetro interno.

Tabela 4.6 - Valores experimentais da constante C_{exp} , dos números de Reynolds no líquido (Re_{v_L}) e na esteira (Re_v) em função da velocidade média do líquido (v_L), com $\alpha = 0,330$ para uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,066$ Pa.s ($\pm 0,001$) e $\rho = 1209$ kg/m³ ($\pm 0,1$) na coluna de 22 mm de diâmetro interno.

Q_G (m ³ /s)	v_L (m/s)	Re_{v_L}	Re_v	C_{exp}
$1,50 \times 10^{-5}$	0,099	40,0	118,1	2,4
$3,45 \times 10^{-5}$	0,252	100,0	189,2	2,3
$5,75 \times 10^{-5}$	0,387	156,1	257,2	2,2
$7,75 \times 10^{-5}$	0,493	195,9	315,4	2,3
$8,75 \times 10^{-4}$	0,539	217,3	320,4	2,2
$1,35 \times 10^{-4}$	0,714	292,3	435,1	2,3

Ensaio 6

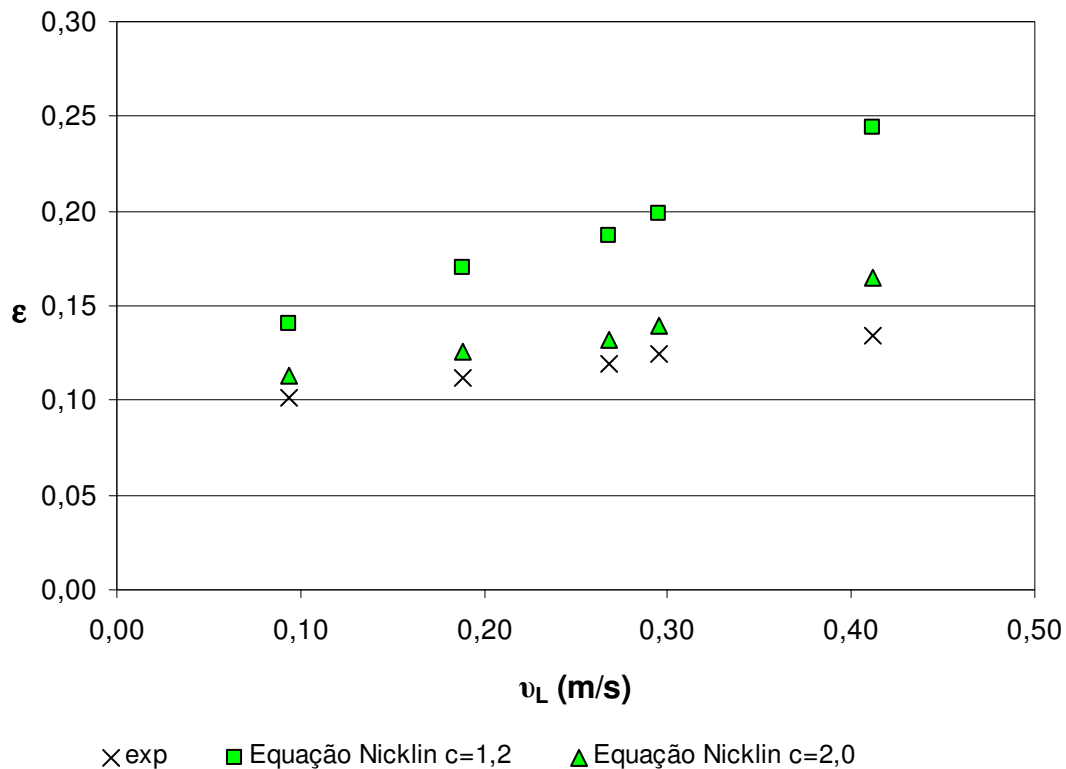


Figura 4.6 - Comparação entre os valores experimentais da retenção e os valores previstos pela equação de Nicklin, usando uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,065$ Pa.s ($\pm 0,001$) e $\rho = 1210$ kg/m³ ($\pm 0,1$) na coluna de 32 mm de diâmetro interno.

Tabela 4.7 - Valores experimentais da constante C_{exp} , dos números de Reynolds no líquido (Re_{vL}) e na esteira (Re_v) em função da velocidade média do líquido (v_L), com $\alpha = 0,280$ para uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,065$ Pa.s ($\pm 0,001$) e $\rho = 1210$ kg/m³ ($\pm 0,1$) na coluna de 32 mm de diâmetro interno.

Q_G (m ³ /s)	v_L (m/s)	Re_{vL}	Re_v	C_{exp}
$3,45 \times 10^{-5}$	0,093	56,4	198,6	2,4
$5,75 \times 10^{-5}$	0,188	113,9	270,8	2,4
$7,75 \times 10^{-5}$	0,268	159,3	319,4	2,3
$8,75 \times 10^{-4}$	0,295	175,6	344,8	2,3
$1,35 \times 10^{-4}$	0,412	241,6	491,2	2,6

Ensaio 7

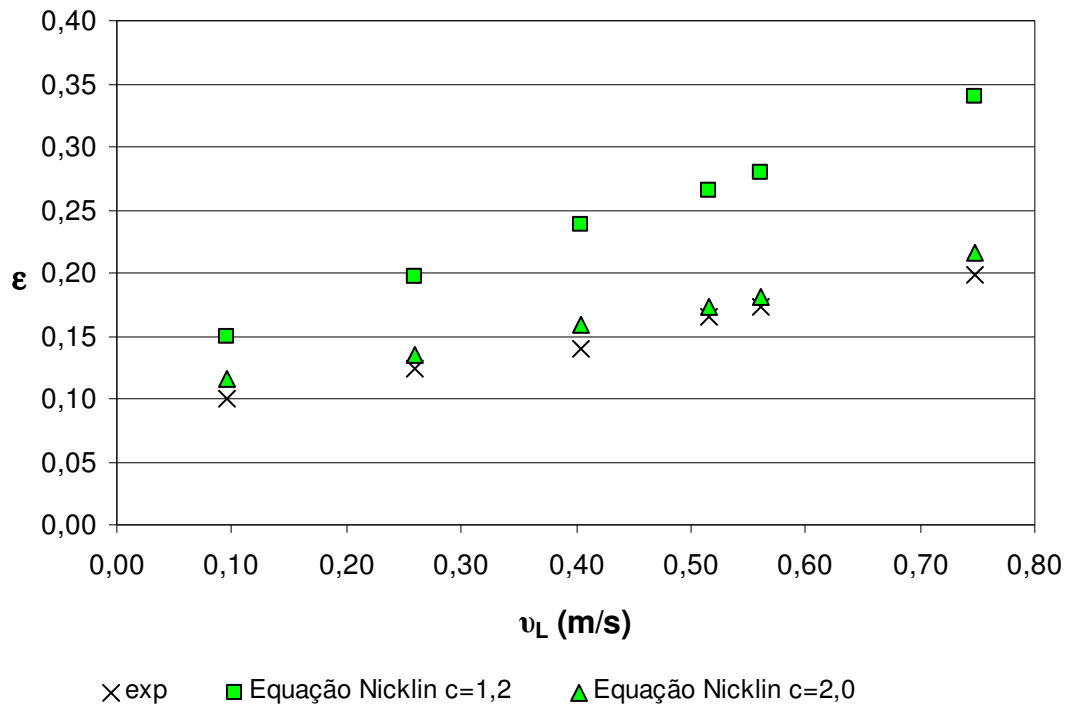


Figura 4.7 - Comparação entre os valores experimentais da retenção e os valores previstos pela equação de Nicklin, usando uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,053$ Pa.s ($\pm 0,001$) e $\rho = 1207$ kg/m³ ($\pm 0,1$) na coluna de 22 mm de diâmetro interno.

Tabela 4.8 - Valores experimentais da constante C_{exp} , dos números de Reynolds no líquido (Re_{vL}) e na esteira (Re_v) em função da velocidade média do líquido (v_L), com $\alpha = 0,322$ para uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,053$ Pa.s ($\pm 0,001$) e $\rho = 1207$ kg/m³ ($\pm 0,1$) na coluna de 22 mm de diâmetro interno.

Q_G (m ³ /s)	v_L (m/s)	Re_{vL}	Re_v	C_{exp}
$1,50 \times 10^{-5}$	0,096	48,2	148,2	2,5
$3,45 \times 10^{-5}$	0,260	130,3	237,0	2,2
$5,75 \times 10^{-5}$	0,404	198,7	332,6	2,3
$7,75 \times 10^{-5}$	0,516	258,5	361,5	2,1
$8,75 \times 10^{-4}$	0,562	281,4	386,5	2,1
$1,35 \times 10^{-4}$	0,748	367,9	512,7	2,2

Ensaio 8

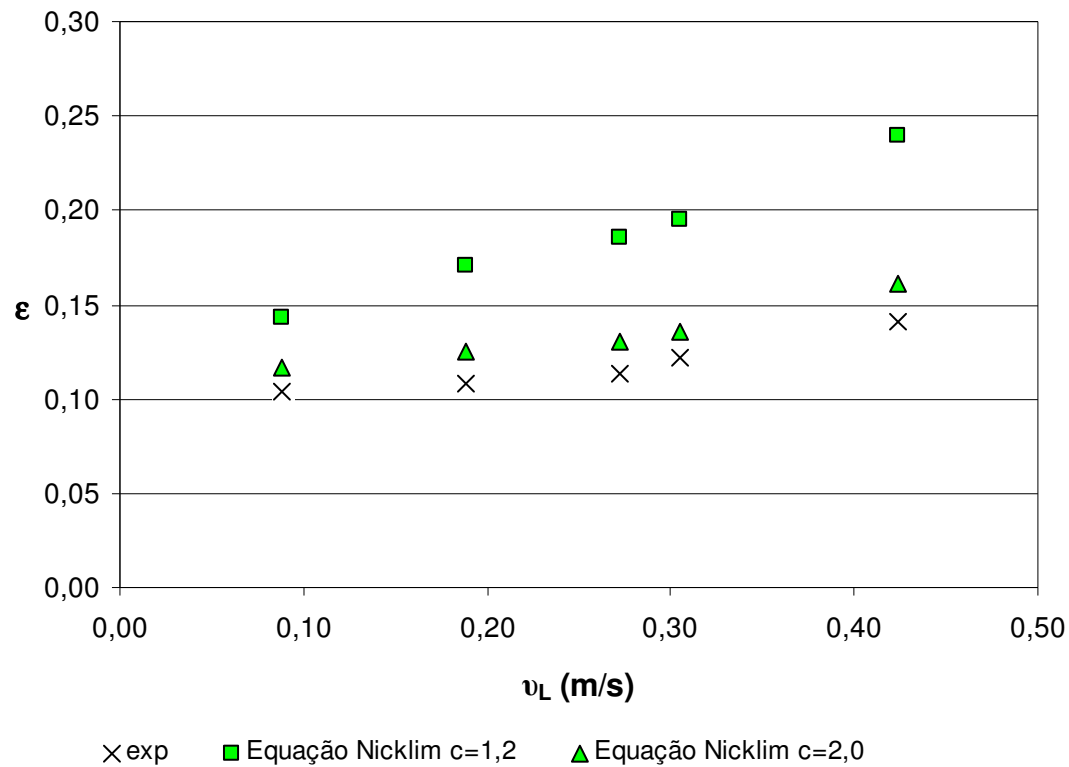


Figura 4.8 - Comparação entre os valores experimentais da retenção e os valores previstos pela equação de Nicklin, usando uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,052$ Pa.s ($\pm 0,001$) e $\rho = 1207$ kg/m³ ($\pm 0,1$) na coluna de 32 mm de diâmetro interno.

Tabela 4.9 - Valores experimentais da constante C_{exp} , dos números de Reynolds no líquido (Re_{v_L}) e na esteira (Re_v) em função da velocidade média do líquido (v_L), com $\alpha = 0,245$ para uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,052$ Pa.s ($\pm 0,001$) e $\rho = 1207$ kg/m³ ($\pm 0,1$) na coluna de 32 mm de diâmetro interno.

Q_G (m ³ /s)	v_L (m/s)	Re_{v_L}	Re_v	C_{exp}
$3,45 \times 10^{-5}$	0,088	65,5	242,5	2,5
$5,75 \times 10^{-5}$	0,189	140,2	351,5	2,5
$7,75 \times 10^{-5}$	0,272	198,3	422,3	2,4
$8,75 \times 10^{-4}$	0,305	226,5	434,4	2,3
$1,35 \times 10^{-4}$	0,424	314,7	569,2	2,4

Para as experiências apresentadas nas figuras 4.5 a 4.8 verifica-se que o regime de escoamento é laminar no líquido entre bolhas e de transição na esteira das bolhas tubulares para a maior parte das velocidades do líquido, como se pode constatar pelos valores de Re_{vL} e Re_v apresentados nas tabelas 4.5 a 4.8.

Os valores obtidos para a retenção experimental são ainda inferiores aos valores teóricos obtidos para $c=2$ (regime laminar) embora os desvios sejam menores sobretudo na coluna de 22 mm. Como consequência destes valores de retenção obtêm-se valores para a constante c experimental superiores a 2.

Nas figuras 4.9 a 4.10 e tabelas 4.9 a 4.10 apresentam-se os resultados relativos à solução aquosa de glicerina com viscosidades menos elevada (0,007 Pa.s) nas colunas com 22 mm e 32 mm de diâmetro interno. Nestas condições a velocidade de subida das bolhas tubulares é apenas dominada pelas forças inerciais e independente das forças viscosas e interfaciais segundo White e Beardmore (1962).

Os números de Reynolds calculados indicam que o escoamento no líquido entre bolhas é laminar e o escoamento é turbulento na esteira das bolhas.

Ensaio 9

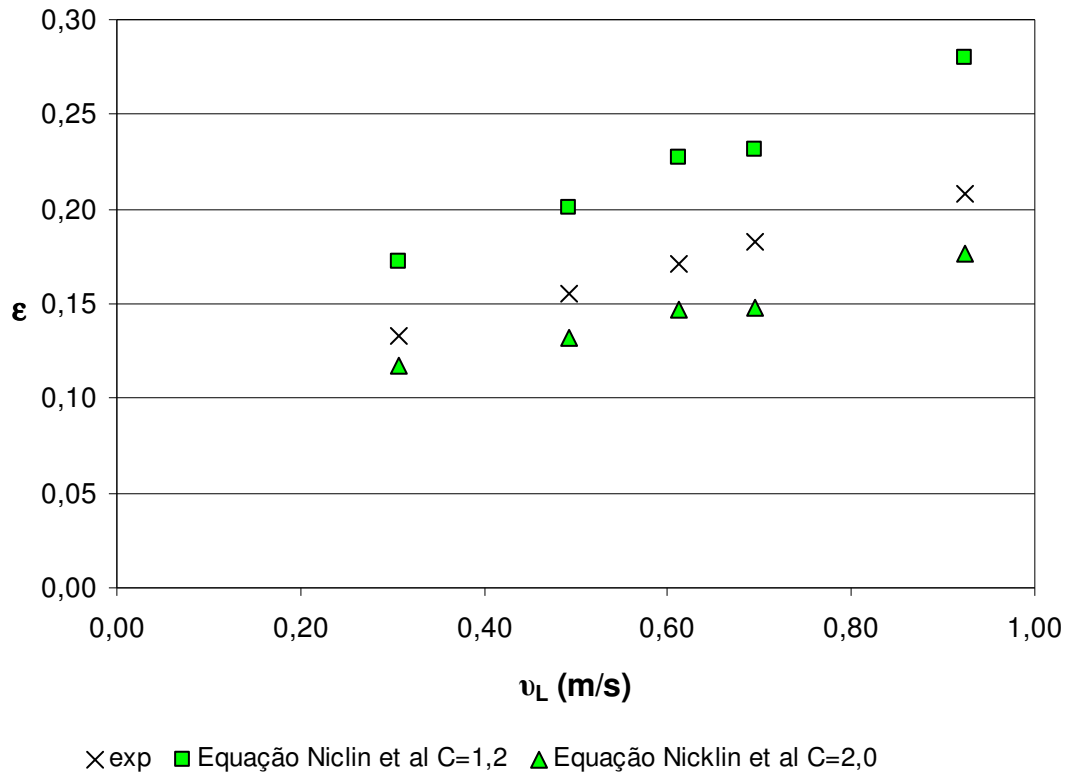


Figura 4.9 - Comparação entre os valores experimentais da retenção e os valores previstos pela equação de Nicklin, usando uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,007 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ($\pm 0,00004$) e $\rho = 1133 \text{ kg/m}^3$ ($\pm 0,1$) na coluna de 22 mm de diâmetro interno.

Tabela 4.10 - Valores experimentais da constante C_{exp} , dos números de Reynolds no líquido (Re_{v_L}) e na esteira (Re_v) em função da velocidade média do líquido (v_L), com $\alpha = 0,345$ para uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,007 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ($\pm 0,00004$) e $\rho = 1133 \text{ kg/m}^3$ ($\pm 0,1$) na coluna de 22 mm de diâmetro interno.

Q_G (m^3/s)	v_L (m/s)	Re_{v_L}	Re_v	C_{exp}
$3,45 \times 10^{-5}$	0,307	1103	1340	1,7
$5,75 \times 10^{-5}$	0,493	1739	1707	1,7
$7,75 \times 10^{-5}$	0,613	2174	2060	1,7
$8,75 \times 10^{-4}$	0,696	2472	2010	1,6
$1,35 \times 10^{-4}$	0,924	3277	2764	1,7

Ensaio 10

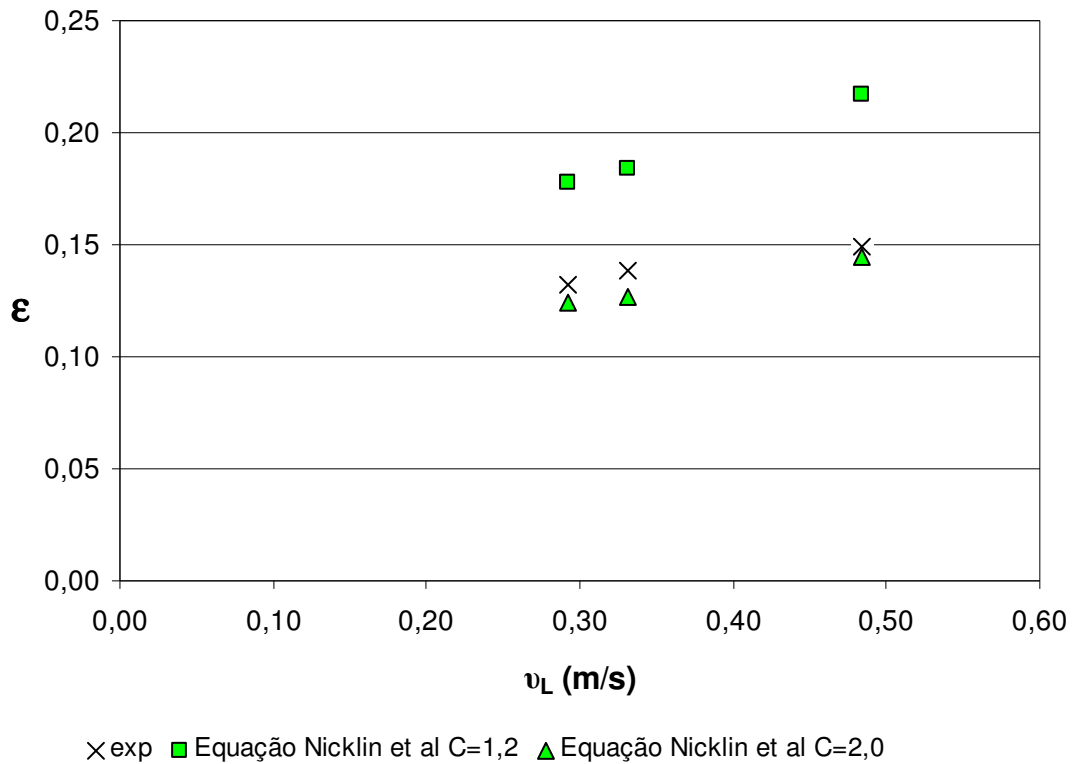


Figura 4.10 - Comparação entre os valores experimentais da retenção e os valores previstos pela equação de Nicklin, usando uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,007$ Pa.s ($\pm 0,00003$) e $\rho = 1134$ kg/m³ ($\pm 0,1$) na coluna de 32 mm de diâmetro interno.

Tabela 4.11 - Valores experimentais da constante C_{exp} , dos números de Reynolds no líquido (Re_{v_L}) e na esteira (Re_v) em função da velocidade média do líquido (v_L), com $\alpha = 0,245$ para uma solução aquosa de glicerina com $\mu = 0,007$ Pa.s ($\pm 0,00003$) e $\rho = 1134$ kg/m³ ($\pm 0,1$) na coluna de 32 mm de diâmetro interno.

Q_G (m ³ /s)	v_L (m/s)	Re_{v_L}	Re_v	C_{exp}
$7,75 \times 10^{-5}$	0,292	1504	2250	1,8
$8,75 \times 10^{-4}$	0,331	1712	2339	1,8
$1,35 \times 10^{-4}$	0,484	2517	3297	1,9

Para as experiências apresentadas nas figuras 4.9 a 4.10 verifica-se que o regime de escoamento é laminar no líquido entre bolhas e turbulento na esteira das bolhas tubulares para a maior parte das velocidades do líquido, como se pode constatar pelos valores de Re_{vL} e Re_v apresentados nas tabelas 4.9 a 4.10.

Os valores obtidos para a retenção experimental são superiores aos valores teóricos obtidos para $c=2$ (regime laminar) embora os desvios sejam menores sobretudo na coluna de 32 mm. Como consequência destes valores de retenção obtêm-se valores para a constante c experimental inferiores a 2.

Nas figuras 4.11 até 4.12 apresentam-se os valores experimentais de retenção de gás para as diferentes viscosidades das soluções em função da velocidade superficial do líquido, nas colunas de 22 e 32 mm de diâmetro interno

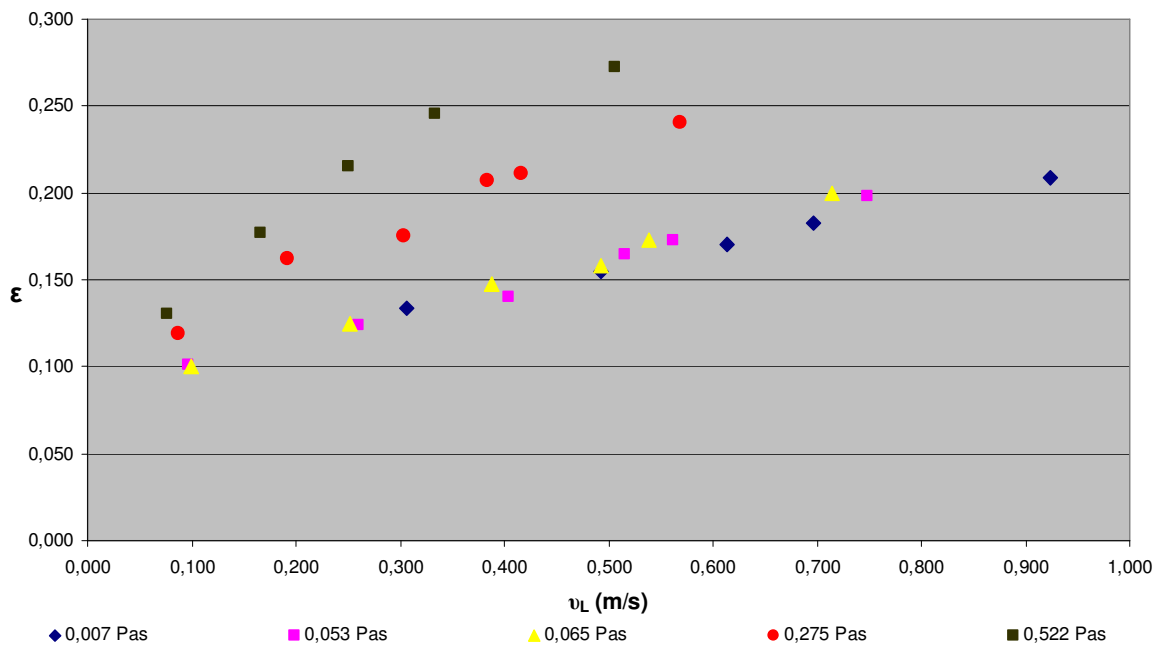


Figura 4.11 - Valores experimentais da retenção em função da velocidade superficial do líquido, para diferentes viscosidades dinâmicas para a coluna de 22 mm de diâmetro interno.

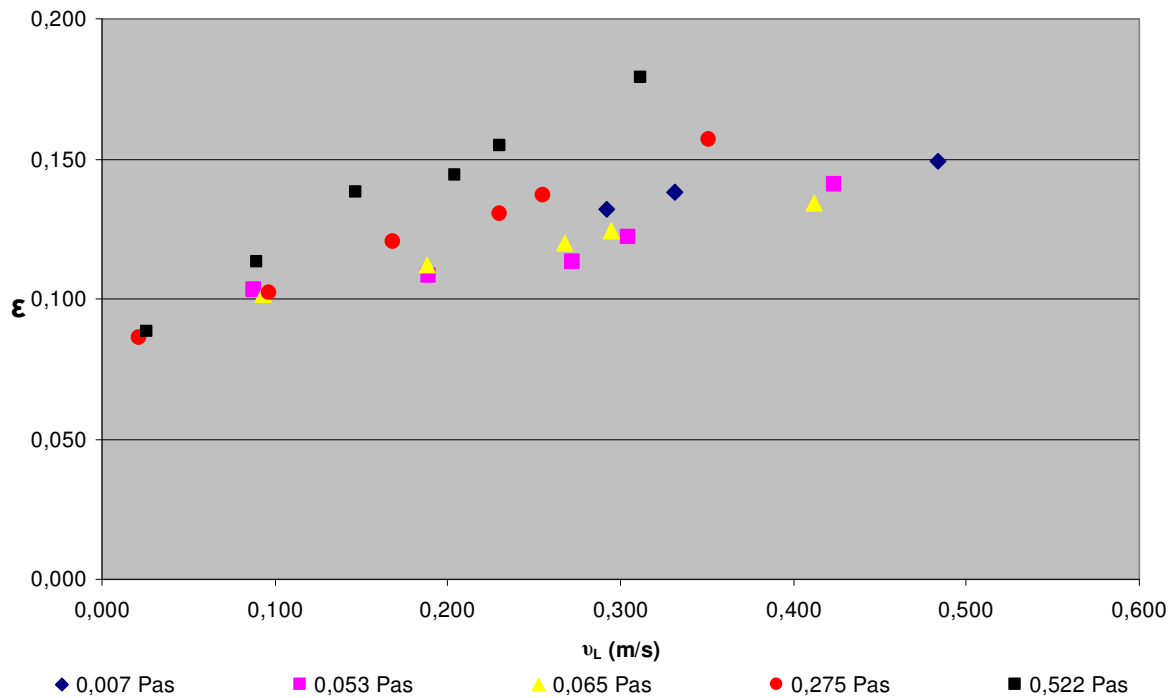


Figura 4.12 - Valores experimentais da retenção em função da velocidade superficial do líquido, para diferentes viscosidades dinâmicas para a coluna de 32 mm de diâmetro interno.

Da análise efectuada às figuras anteriores conclui-se que:

- ✓ Os valores da retenção ϵ , aumentam com o aumento da velocidade média do líquido em escoamento, v_L , para soluções com a mesma viscosidade;
- ✓ De uma forma geral quanto maior a viscosidade da fase líquida maior a retenção para o mesmo valor de velocidade do líquido em escoamento. A excepção verificou-se para a coluna de 32 mm com a solução de 0,007 Pa.s possivelmente por poder estar associado um erro experimental mais elevado à retenção e ao caudal de líquido determinados dado que se verificou que o caudal oscilava significativamente.
- ✓ Quanto maior o diâmetro da coluna de borbulhamento menores os valores de retenção observados para a mesmas velocidades superficiais do líquido;
- ✓ Quanto maior o diâmetro da coluna de borbulhamento menor a influência da velocidade média do líquido, v_L , nos valores da retenção. Esta variação é devida ao facto do peso do factor Cv_L (na equação 2.7) no cálculo da velocidade de subida das bolhas, diminuir à medida que o diâmetro da coluna aumenta.

4.2. Comparação da retenção de gás na coluna de borbulhamento para várias razões de submersão

Outro dos objectivos deste trabalho foi comparar os resultados experimentais obtidos no presente trabalho, impondo uma razão de submersão de 0,85, com os valores obtidos por outros autores, nomeadamente, Santos (2004), Santos (2005) e Rangel (2008) que utilizaram valores diferentes para a razão de submersão. Santos (2004) utilizou uma coluna do tipo CRIL (coluna de recirculação interna de líquido), com uma razão de submersão de 0,935. Santos (2005) por sua vez utilizou a mesma razão de submersão de 0,935, mas variou o tipo de coluna utilizando uma CREL (coluna de recirculação externa de líquido). Rangel (2008) utilizou uma coluna do tipo CREL variando a razão de submersão para 0,91.

Deste modo foi possível analisar o efeito da razão de submersão sobre a hidrodinâmica da coluna de recirculação de líquido, para vários valores de viscosidade da solução em escoamento.

Nas figuras 4.13 a 4.19 são apresentados os valores experimentais da retenção para diferentes razões de submersão para as colunas de 22 mm e 32 mm. São ainda apresentadas ajustes lineares dos resultados experimentais obtidos no presente trabalho (referido como Vila Nova J., 2009) e no trabalho realizado por Santos (2004) para facilitar a análise das diferenças resultantes da diminuição em 9% da razão de submersão.

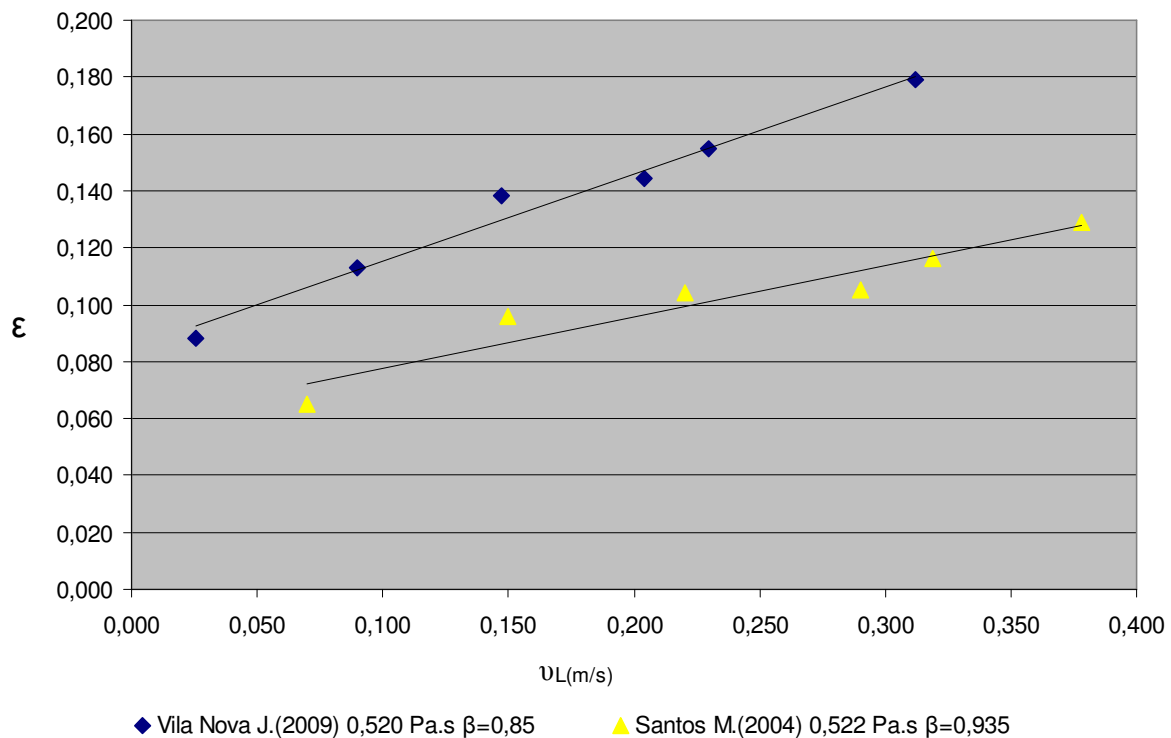
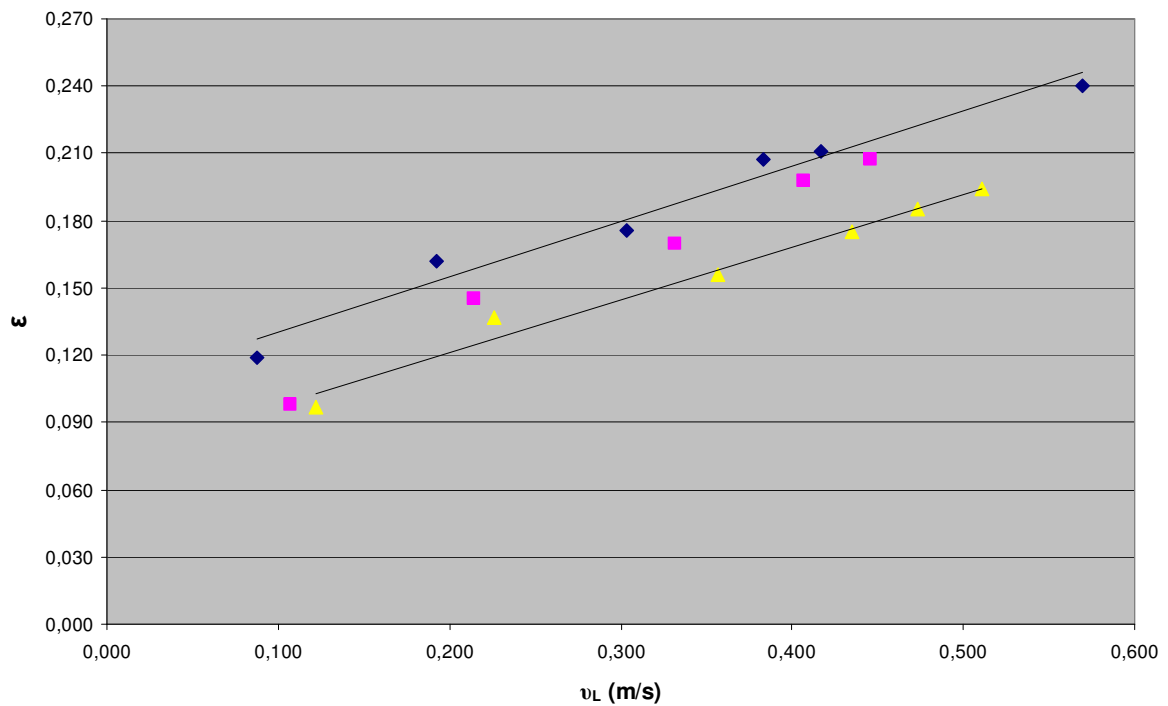
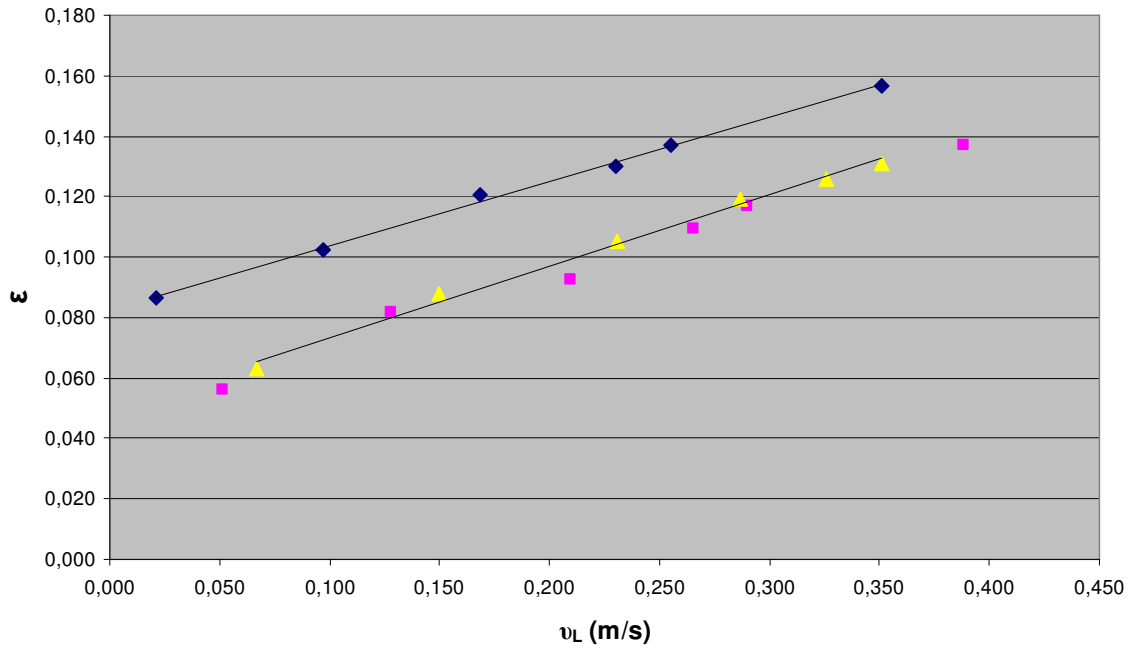


Figura 4.13 - Comparação dos valores experimentais da retenção para diferentes razões de submersão (0,85 e 0,935) na coluna de 32 mm de diâmetro ($\mu = 0,520$ Pa.s).



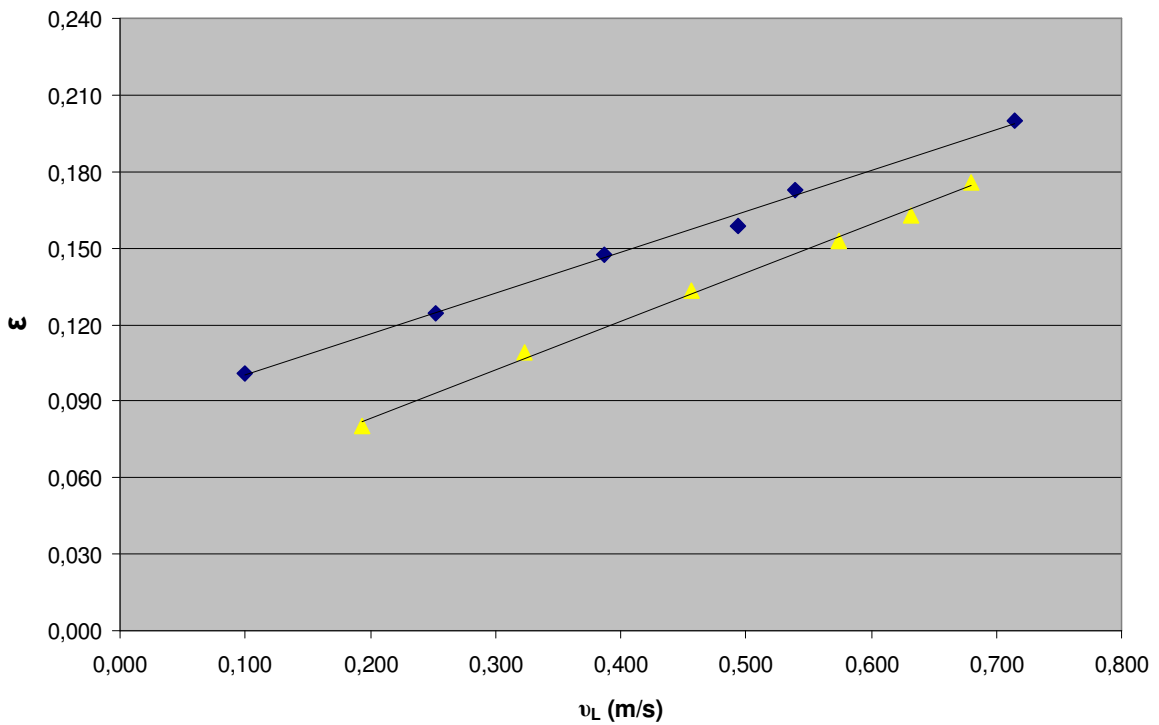
◆ Vila Nova J.(2009) 0,274 Pa.s $\beta=0,85$ ■ Rangel A.(2008) 0,274 Pa.s $\beta=0,91$ ▲ Santos M.(2004) 0,268 Pa.s $\beta=0,935$

Figura 4.14 - Comparação dos valores experimentais da retenção para diferentes razões de submersão (0,85; 0,91 ;0,924 e 0,935) na coluna de 22 mm de diâmetro ($\mu = 0,268 - 0,274$ Pa.s)



◆ Vila Nova J.(2009) 0,278 Pa.s $\beta=0,85$ ■ Rangel A.(2008) 0,274 Pa.s $\beta=0,91$ ▲ Santos M.(2004) 0,298 Pa.s $\beta=0,935$

Figura 4.15 - Comparação dos valores experimentais da retenção para diferentes razões de submersão (0,85;0,91 e 0,935) na coluna de 32 mm de diâmetro ($\mu = 0,274 - 0,298$ Pa.s)



◆ Vila Nova J.(2009) 0,065 Pa.s $\beta=0,85$ ▲ Santos M.(2004) 0,065 Pa.s $\beta=0,935$

Figura 4.16 - Comparação dos valores experimentais da retenção para diferentes razões de submersão (0,85; e 0,935) na coluna de 22 mm de diâmetro ($\mu = 0,065$ Pa.s)

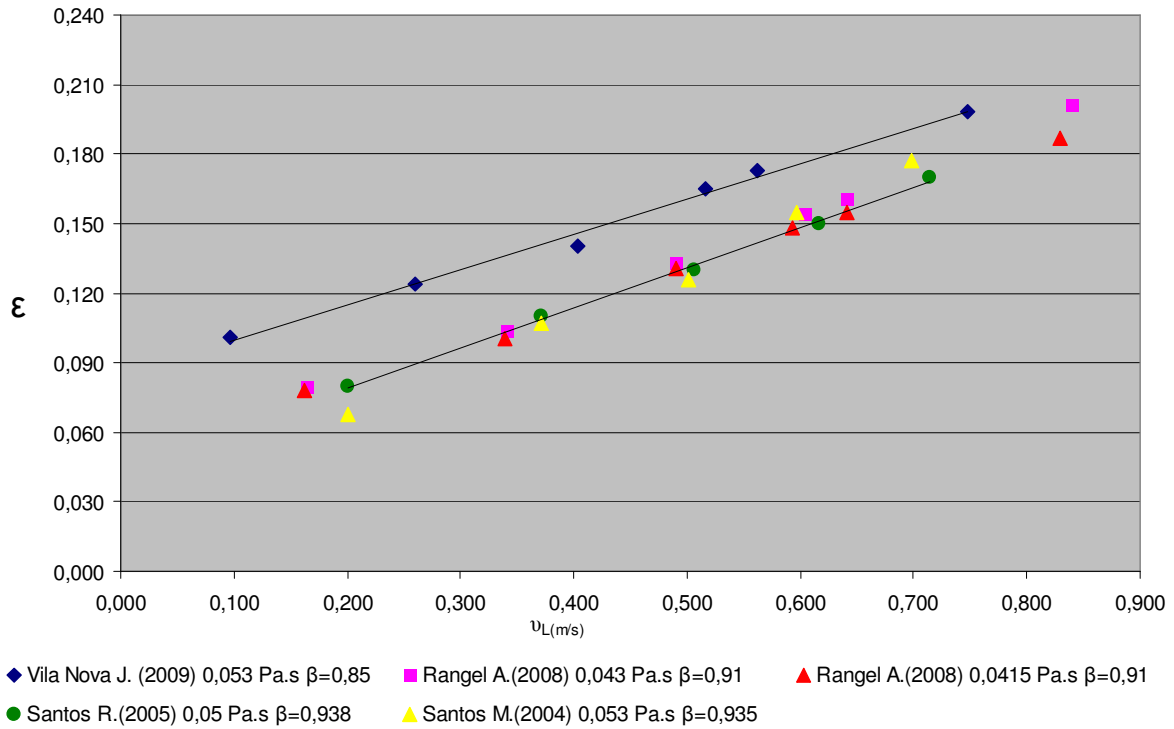


Figura 4.17 - Comparação dos valores experimentais da retenção para diferentes razões de submersão (0,85;0,91;0,935 e 0,938) na coluna de 22 mm de diâmetro e viscosidades semelhantes ($\mu = 0,0415 - 0,053$ Pa.s).

Na figura 4.17 optou-se por fazer um ajuste linear dos resultados obtidos por Santos (2005) por se ter verificado na análise dos resultados de Santos (2004) que estes apresentavam erros mais elevados para os caudais maiores.

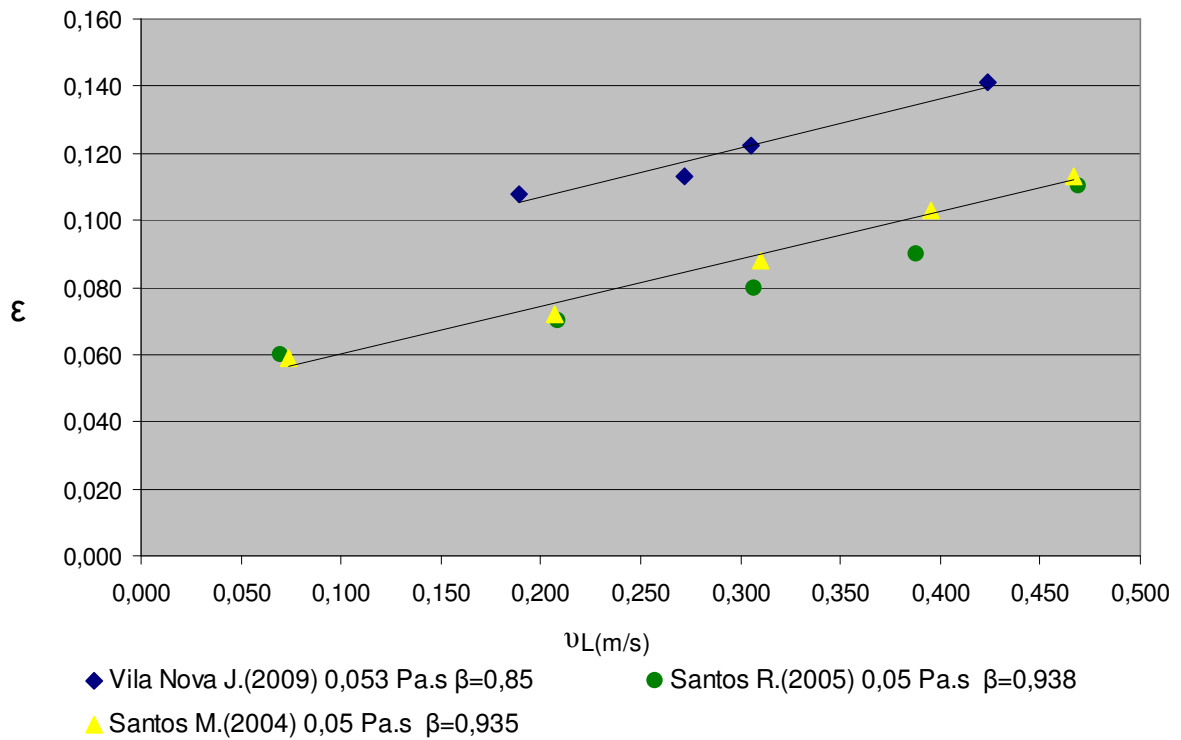


Figura 4.18 - Comparação dos valores experimentais da retenção para diferentes razões de submersão (0,85;0,91;0,935 e 0,938) na coluna de 32 mm de diâmetro ($\mu = 0,05 - 0,053$ Pa.s)

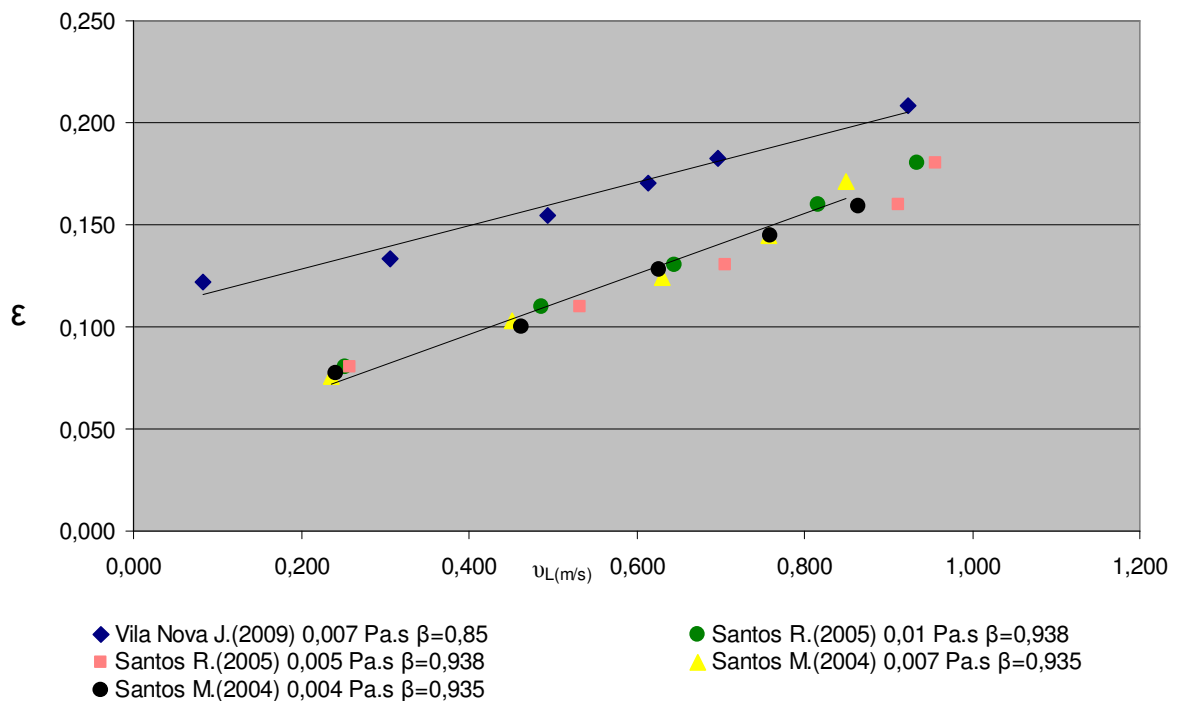


Figura 4.19 - Comparação dos valores experimentais da retenção para diferentes razões de submersão (0,85; 0,935) na coluna de 22 mm de diâmetro ($\mu = 0,004$ a $0,01$ Pa.s).

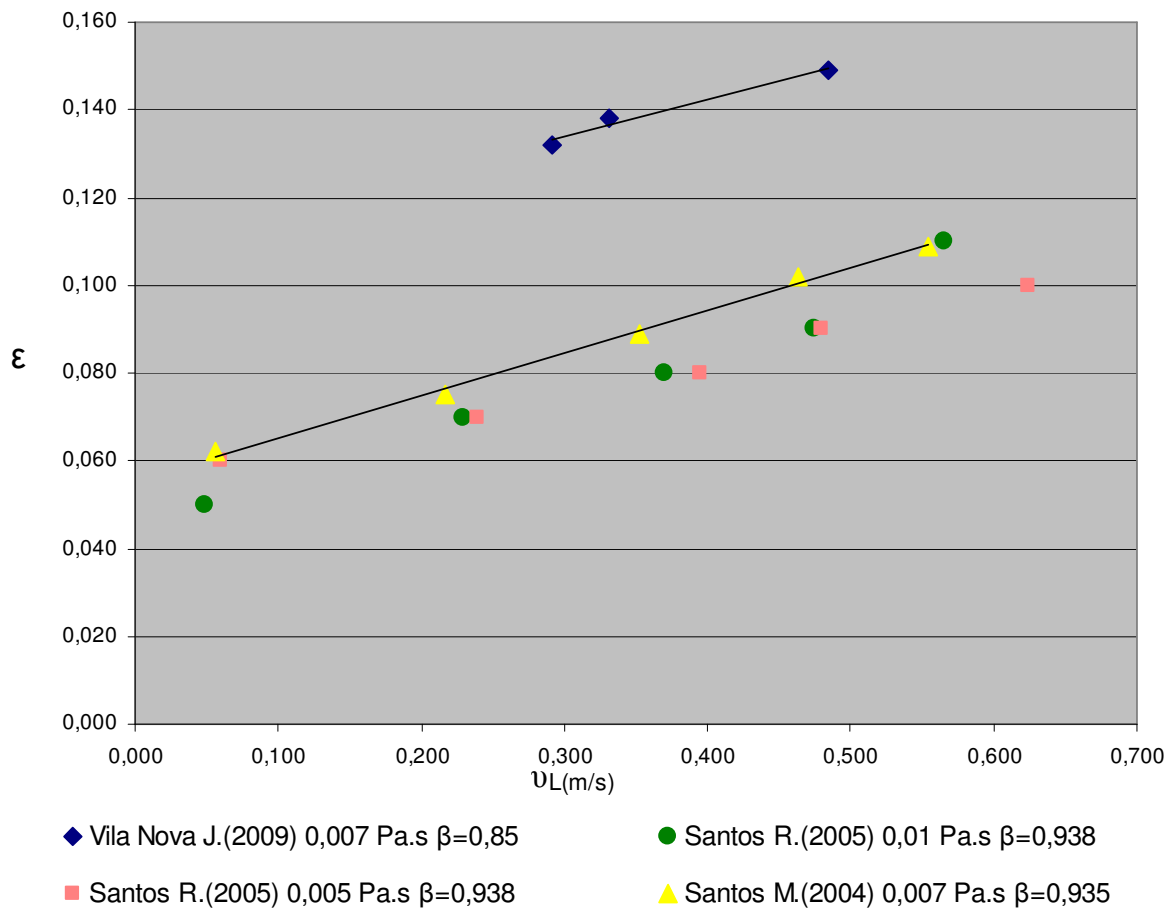


Figura 4.20 - Comparação dos valores experimentais da retenção para diferentes razões de submersão (0,85;0, 0,935) na coluna de 32 mm de diâmetro ($\mu = 0,007$ a $0,01$ Pa.s).

As figuras apresentadas anteriormente permitem concluir que a retenção aumenta com a diminuição da razão de submersão. Daqui se conclui que a diminuição da razão de submersão provoca uma diminuição da força directriz responsável pela movimentação do líquido, originando velocidades de ascensão das bolhas inferiores e consequentemente retenções na coluna superiores.

No caso da diminuição da retenção de 0,935 para 0,91 conforme já concluído por Rangel (2008) não se observam diferenças significativas na retenção.

Para o caso do presente estudo apesar dos aumentos na retenção serem bastantes semelhantes em todas as experiências, verifica-se que os maiores aumentos na retenção se obtêm para a solução com viscosidade mais elevada (0,520 Pa.s, figura 4.13), na coluna com 32 mm de diâmetro interno.

Nesta experiência a retenção aumentou, em relação aos resultados obtidos por Santos (2004), entre cerca de 0,035 e 0,069, em termos absolutos. Em termos relativos verifica-se um aumento entre cerca de 36% e 66%.

Para a experiência realizada com as soluções com viscosidades de 0,274 Pa.s, 0,065 Pa.s e 0,053 Pa.s, em ambas as colunas (figuras 4.14 a 4.18), verificou-se que o aumento da retenção, relativamente à obtida por Santos (2004), em termos absolutos, é muito semelhante oscilando entre 0,020 e 0,044. Em termos relativos, os aumentos na coluna com 32 mm são maiores uma vez que os valores das retenções são inferiores aos obtidos para a coluna de 22 mm.

Nas experiências com a solução de 0,007 Pa.s, em ambas as colunas (figuras 4.19 a 4.20), as diferenças entre as retenções obtidas no presente estudo e as obtidas por Santos (2004) são maiores, variando entre 0,04 e 0,05. Neste caso estas diferenças um pouco mais elevadas podem dever-se a erros experimentais mais elevados devido às oscilações observadas no caudal de líquido em escoamento.

4.3. Velocidade média do líquido em escoamento na coluna de borbulhamento

Nas figuras 4.21 a 4.22, estão representados os valores experimentais da velocidade média do líquido, v_L , na coluna de borbulhamento em função do caudal de gás injectado, obtidos para diferentes viscosidades das soluções aquosas de glicerina, nas colunas com 32mm e 22mm de diâmetro interno.

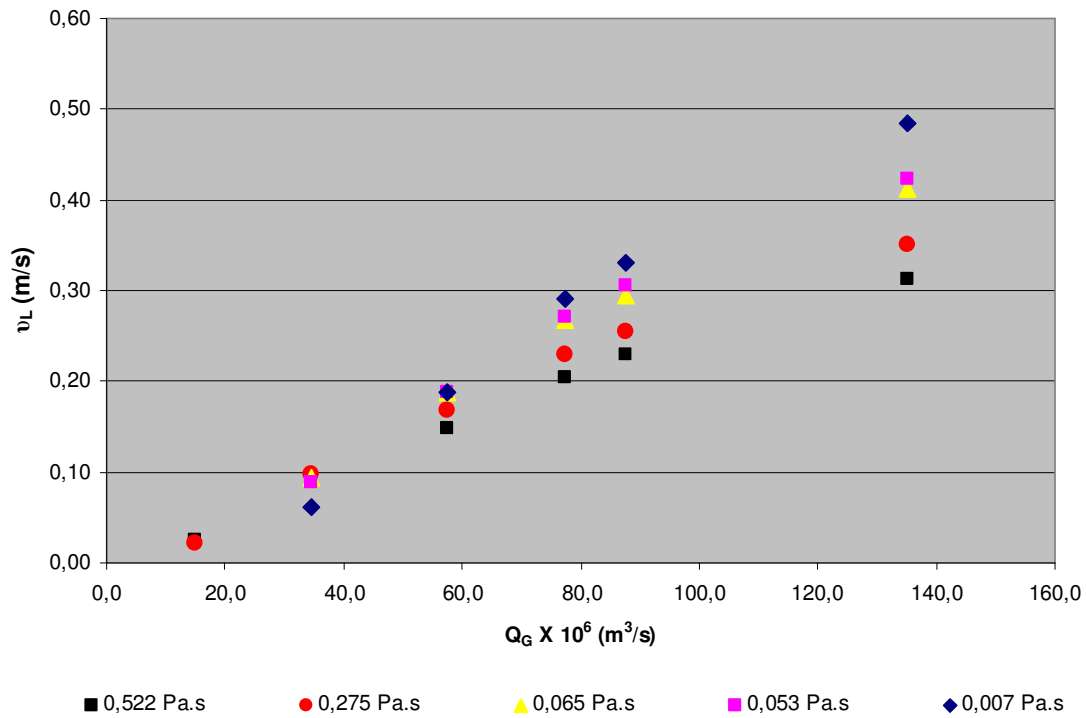


Figura 4.21 - Valores experimentais da velocidade do líquido em função do caudal de gás injectado para diferentes viscosidades usando a coluna de diâmetro interno de 32 mm.

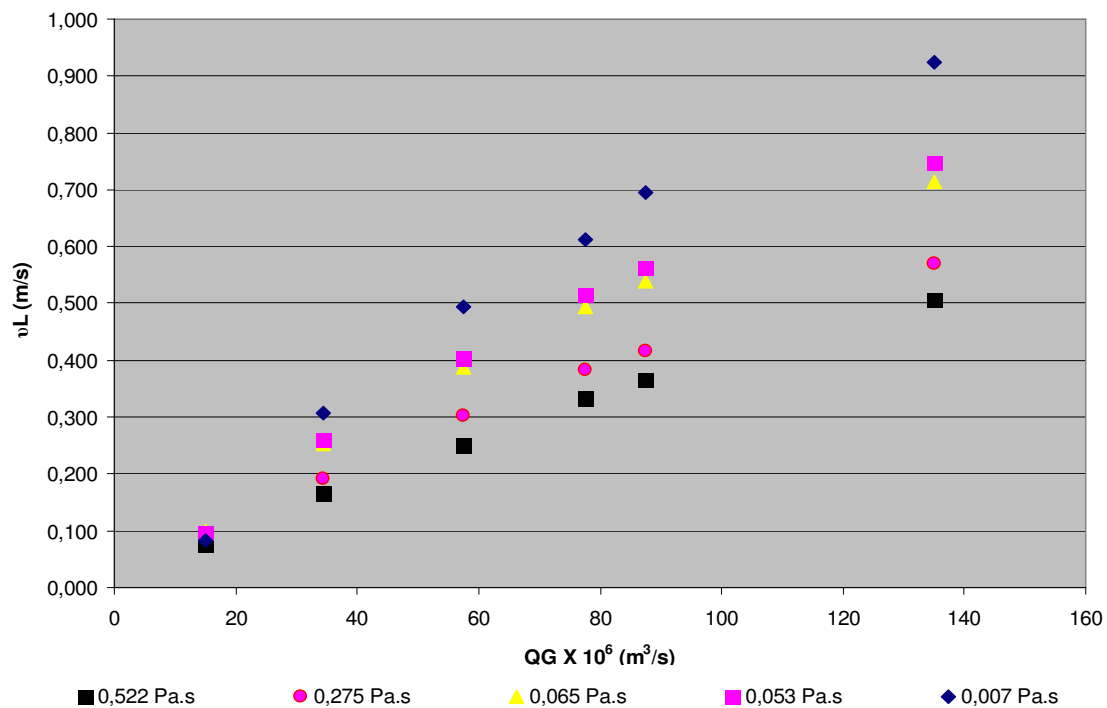


Figura 4.22 - Valores experimentais da velocidade do líquido em função do caudal de gás injectado para diferentes viscosidades usando a coluna de diâmetro interno de 22 mm.

Analisando os gráficos dos resultados experimentais obtidos para as colunas de 22 e 32 mm de diâmetro interno, podemos concluir que a velocidade superficial de escoamento do líquido entre bolhas, v_L , aumenta com a diminuição da viscosidade exceptuando para o caudal mais baixo ($1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$), onde o valor é praticamente o mesmo. Este aumento da velocidade do líquido é mais significativo para as soluções menos viscosas.

Quanto ao efeito do diâmetro da coluna, verifica-se que quanto menor o diâmetro da coluna, mais elevada a velocidade superficial do líquido em escoamento, v_L .

4.4. Comparação dos valores experimentais da velocidade do líquido para diferentes razões de submersão

Nas figuras 4.23 a 4.30 apresentam-se os resultados de velocidade superficial do líquido na coluna de borbulhamento para duas razões de submersão, para as colunas de 22 mm e 32 mm de diâmetro interno. Os resultados obtidos no presente estudo são referidos como Vila Nova J. (2009).

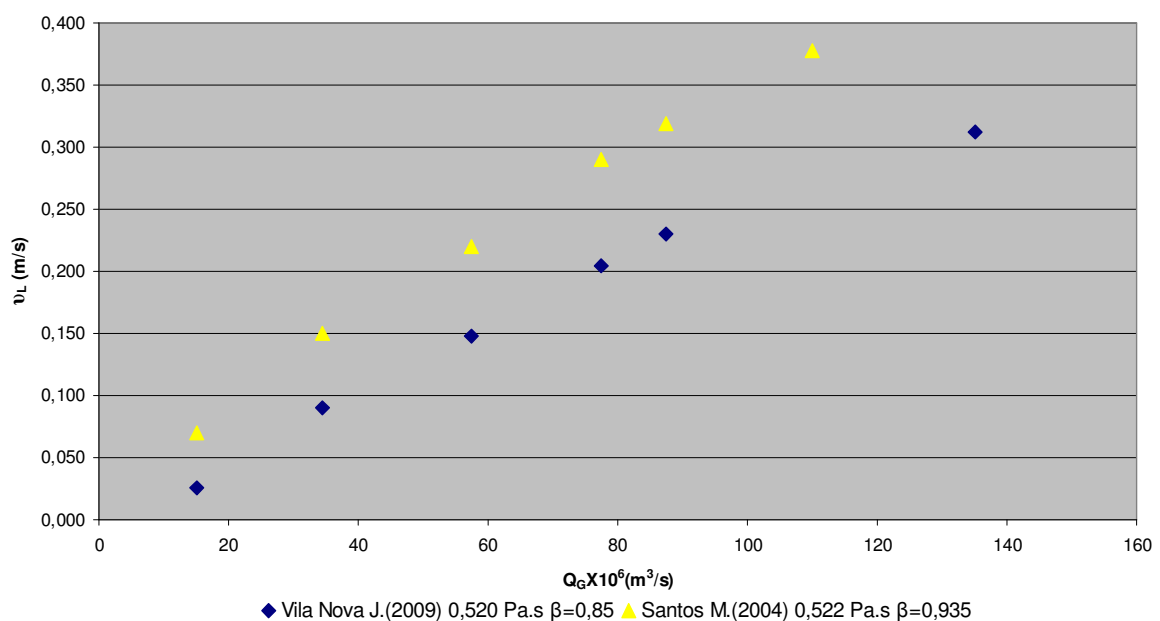


Figura 4.23 - Valores experimentais da velocidade do líquido em função do caudal de gás injectado para soluções aquosas de glicerina com viscosidade de 0,520-0,522 Pa.s usando a coluna de diâmetro interno de 32 mm.

Pela análise da figura anterior pode-se concluir que quanto menor for a taxa de submersão, menor a velocidade de escoamento. Observa-se um decréscimo entre 0,05 e 0,1 m/s na velocidade de escoamento do líquido.

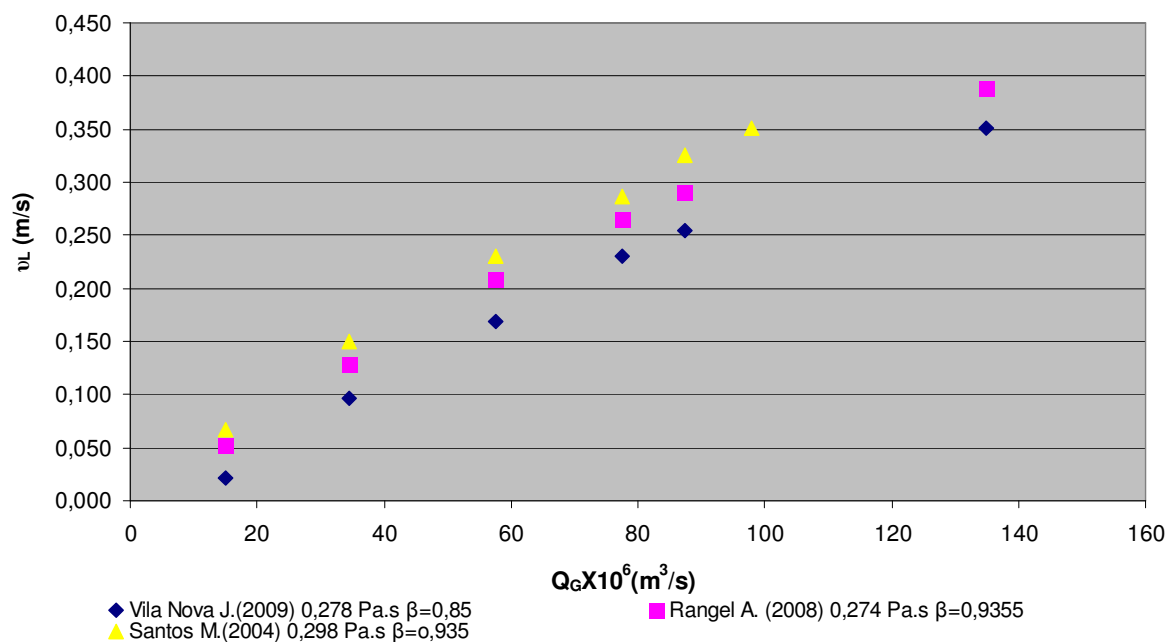


Figura 4.24 - Valores experimentais da velocidade do líquido em função do caudal de gás injectado para soluções aquosas de glicerina com viscosidade de 0,274-0,298 Pa.s usando a coluna de diâmetro interno de 32 mm.

Pela análise da figura 4.24 pode-se concluir que quanto menor for a taxa de submersão, menor a velocidade de escoamento do líquido comparando os valores do presente trabalho (Vila Nova (2009)) e os obtidos por Rangel (2008). Observa-se um decréscimo de cerca de 0,035 m/s na velocidade de escoamento do líquido.

Quanto às diferenças obtidas entre os resultados de Santos (2004) e de Rangel (2008), embora estas sejam muito pequenas, o efeito da diminuição da razão de submersão sobre a velocidade do líquido (que tende a diminuir v_L) sobrepõe-se ligeiramente ao efeito da diminuição da viscosidade (que tende a aumentar v_L).

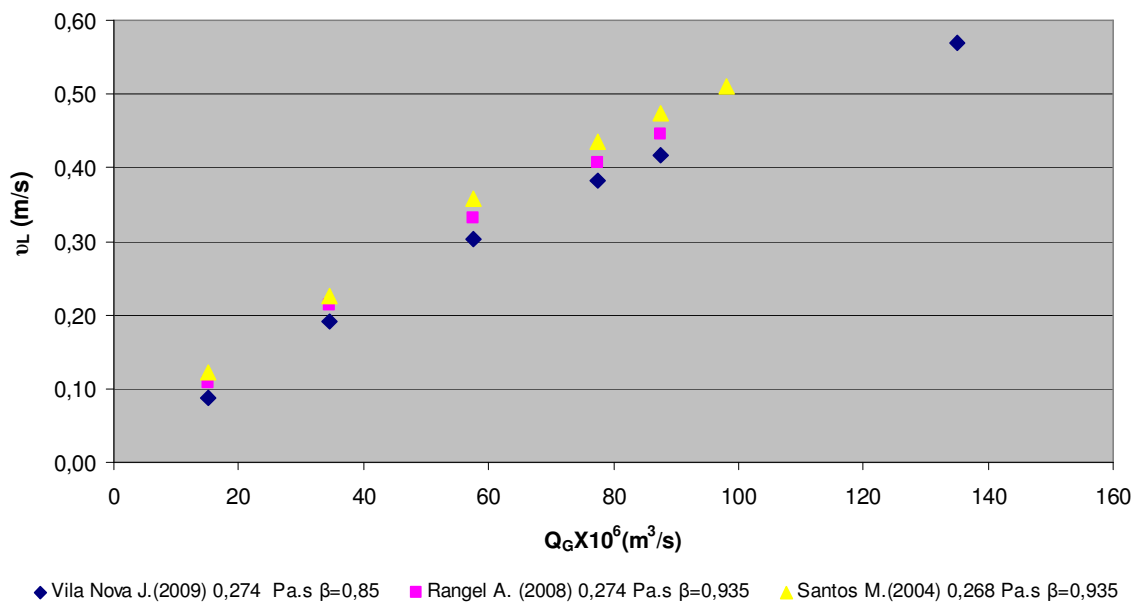


Figura 4.25 - Valores experimentais da velocidade do líquido em função do caudal de gás injectado para soluções aquosas de glicerina com viscosidade de 0,268-0,275 Pa.s usando a coluna de diâmetro interno de 22 mm.

Pela análise da figura anterior novamente se observa que quanto menor a razão de submersão, menor a velocidade de escoamento do líquido. Observa-se um decréscimo de cerca de 0,05 m/s na velocidade de escoamento do líquido do presente trabalho relativamente à velocidade obtida por Santos (2004).

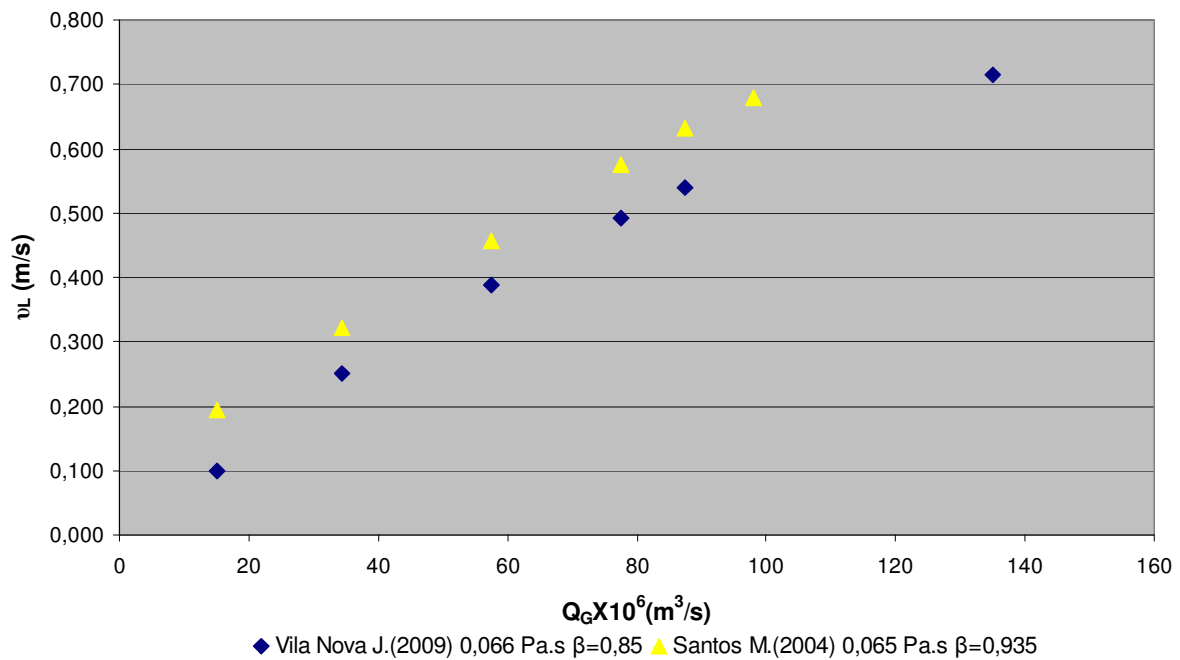


Figura 4.26 - Valores experimentais da velocidade do líquido em função do caudal de gás injectado para soluções aquosas de glicerina com viscosidade de 0,065 Pa.s usando a coluna de diâmetro interno de 22 mm.

Pela análise da figura 4.26 pode-se concluir que quanto menor for a taxa de submersão, menor a velocidade de escoamento observando-se um decréscimo de cerca de 0,1 m/s.

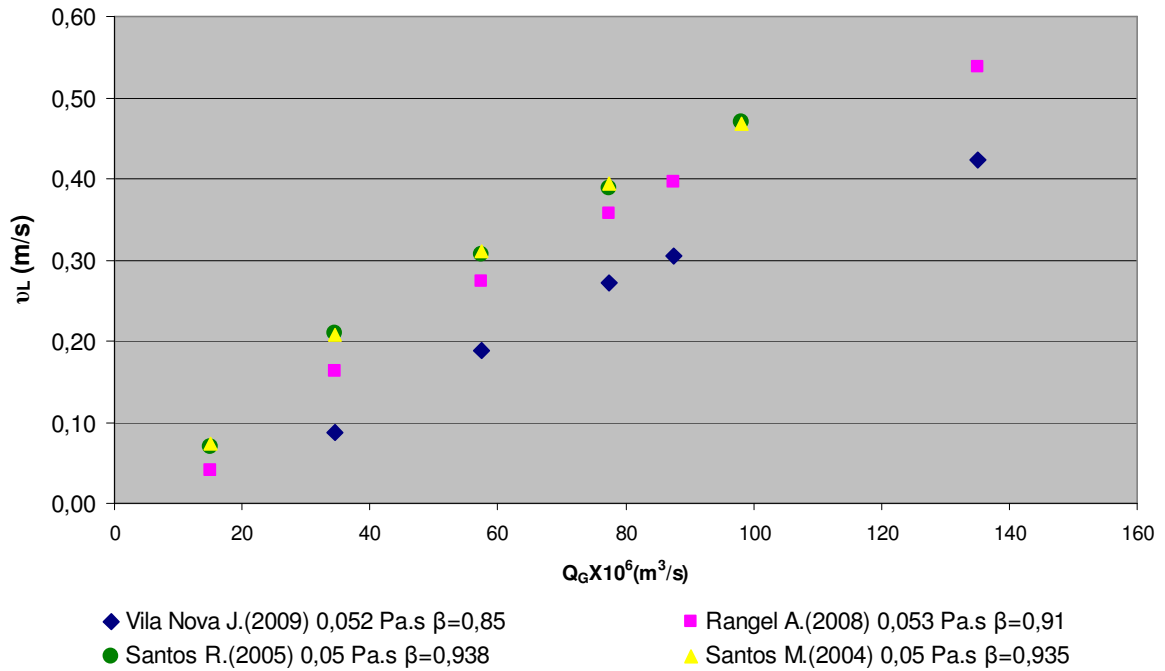


Figura 4.27 - Valores experimentais da velocidade do líquido em função do caudal de gás injectado para soluções aquosas de glicerina com viscosidade de 0,05-0,053 Pa.s usando a coluna de diâmetro interno de 32 mm.

Pela análise da figura 4.27 pode-se concluir que quanto menor for a taxa de submersão, menor a velocidade de escoamento observando-se um decréscimo de cerca de 0,12 m/s relativamente aos resultados obtidos por Santos (2004).

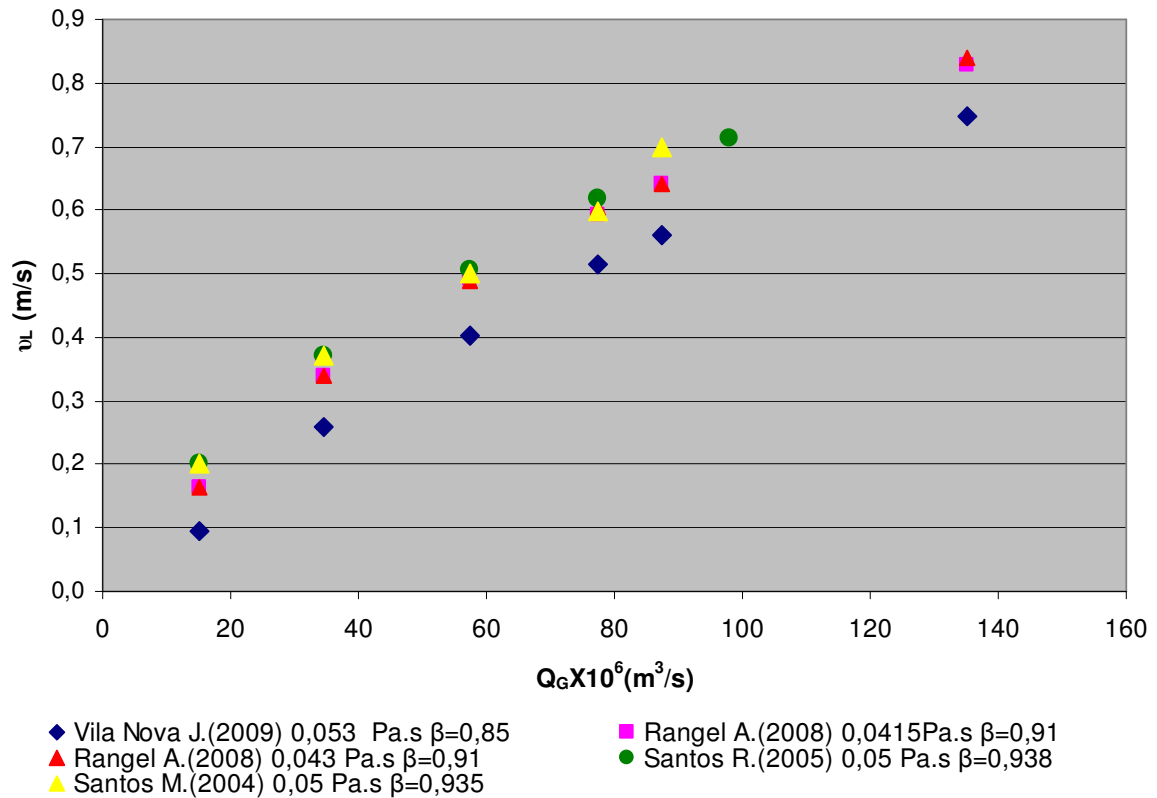


Figura 4.28 - Valores experimentais da velocidade do líquido em função do caudal de gás injectado para soluções aquosas de glicerina com viscosidade de 0,0415-0,053 Pa.s usando a coluna de diâmetro interno de 22 mm.

Pela análise da figura anterior pode-se verificar que a diminuição da razão de submersão provoca uma diminuição de cerca de 0,1 m/s na velocidade de escoamento do líquido.

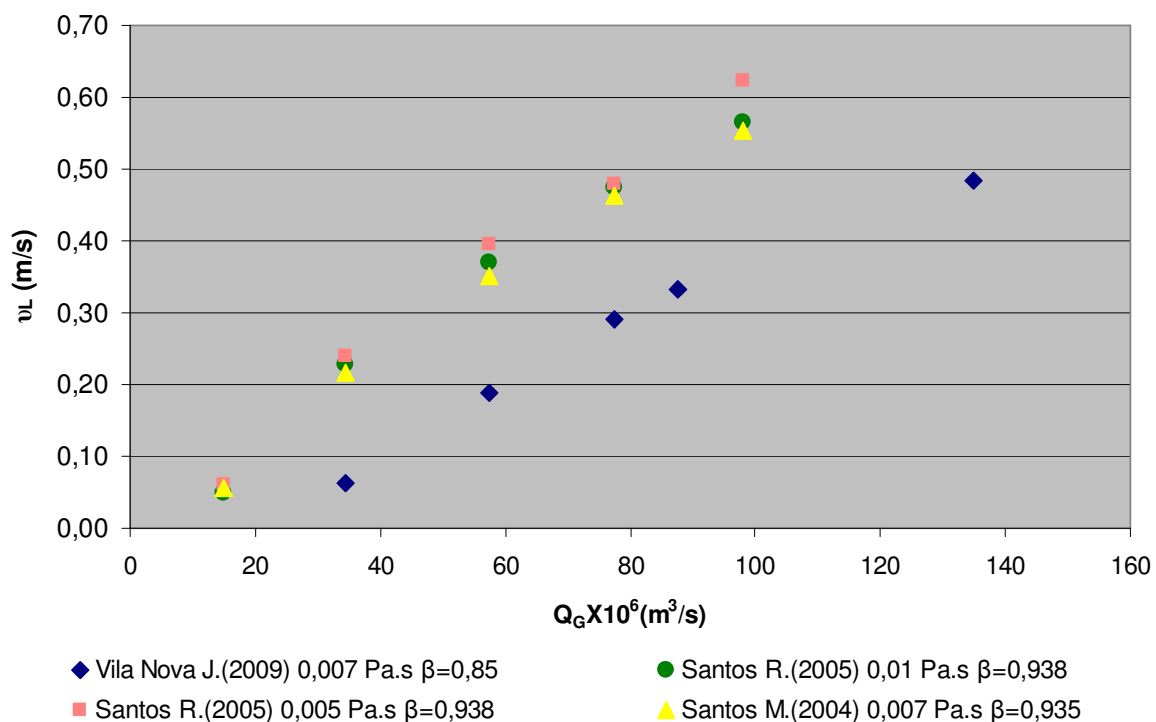


Figura 4.29 - Valores experimentais da velocidade do líquido em função do caudal de gás injectado para soluções aquosas de glicerina com viscosidade de 0,005-0,010 Pa.s usando a coluna com diâmetro interno de 32 mm.

Pela análise da figura anterior pode-se verificar que a diminuição da razão de submersão provoca uma diminuição de cerca de 0,15 m/s na velocidade de escoamento do líquido.

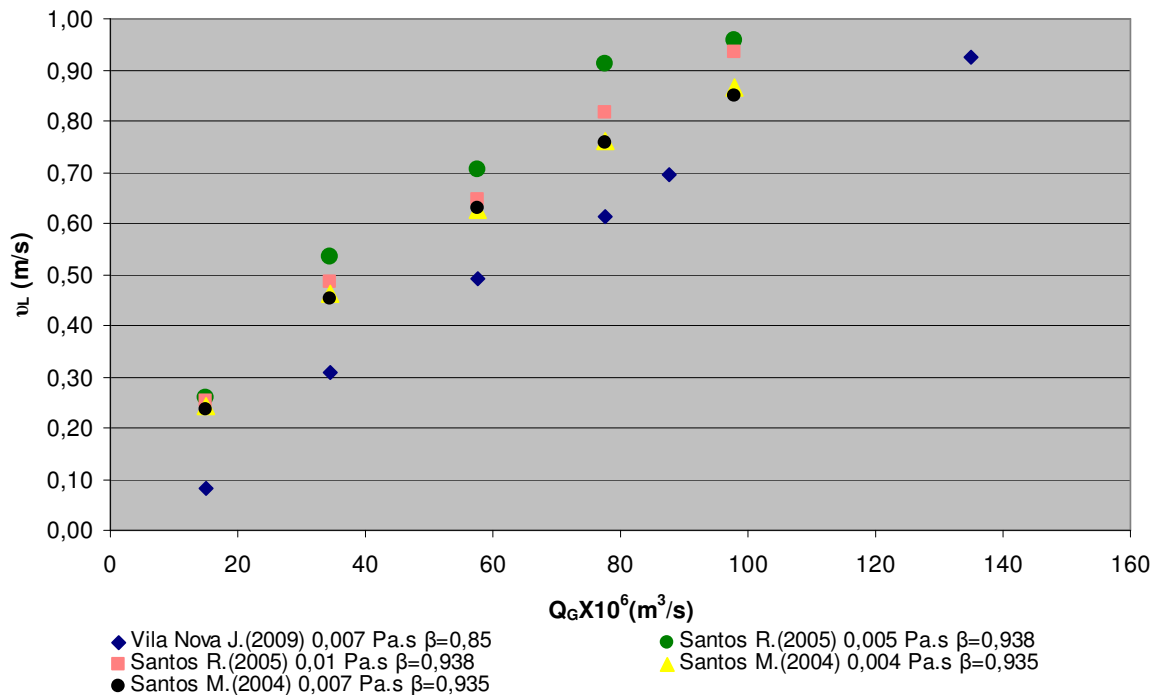


Figura 4.30 - Valores experimentais da velocidade do líquido em função do caudal de gás injectado para soluções aquosas de glicerina com viscosidade de 0,004-0,010 Pa.s usando a coluna com diâmetro interno de 22 mm.

Pela análise da figura 4.30 pode-se verificar que a diminuição da razão de submersão provoca uma diminuição de cerca de 0,07 m/s na velocidade de escoamento do líquido,

Em todas as figuras apresentadas, figuras 4.23 a 4.30, se observa que a velocidade de escoamento do líquido diminui com o aumento da razão de submersão para o mesmo caudal de gás injectado na coluna.

De uma forma geral verifica-se que as velocidades decrescem mais para a solução menos viscosas (0,007 Pa.s), entre cerca de 0,1 m/s e 0,15 m/s quando a comparação é feita com Santos (2004); para estas soluções a velocidade máxima atingida foi de 0,924 m/s, nas experiências realizadas por Vila Nova (2009) com uma razão de submersão de 0,85.

Quanto às restantes soluções (0,053 Pa.s, 0,065 Pa.s, 0,278 Pa.s e 0,522 Pa.s) esses decréscimos são ligeiramente menores oscilando entre 0,05 m/s e 0,1 m/s; para estas soluções a velocidade máxima atingida varia entre 0,57 m/s e 0,75 m/s nas experiências realizadas no presente estudo com uma razão de submersão de 0,85..

As diminuições referidas para a velocidade superficial v_L são percentualmente mais significativos na coluna de 32 mm dado que as velocidades do líquido são bastante inferiores nesta coluna.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

O presente trabalho teve como objectivo o estudo hidrodinâmico de uma coluna de recirculação de líquido por borbulhamento através de um tubo exterior. Nas condições experimentais estabelecidas o regime de escoamento do gás através do líquido foi o de bolhas tubulares.

Foram estudados experimentalmente a retenção de gás e a velocidade superficial de líquido em circulação na coluna de borbulhamento para uma gama alargada de condições de operação. Estas condições permitiram estabelecer regime de escoamento laminar entre as bolhas tubulares e diferentes regimes de escoamento na esteira das referidas bolhas (desde laminar a turbulento). Foi dado maior relevo neste estudo ao regime laminar no líquido em escoamento entre bolhas, que se obtém para soluções mais viscosas, pois este é o regime em que há menos informação.

A nível experimental verificou-se que para as soluções menos viscosas (0,053 Pa.s e 0,007 Pa.s), utilizando a coluna de 32 mm, o caudal de gás necessário para haver circulação contínua de líquido do topo da coluna para o tanque de recolha é bastante superior ao necessário nas experiências realizadas por outros autores com razões de submersão superiores (0,935 e 0,91). No estudo da retenção verificou-se que o aumento da viscosidade das soluções aquosas de glicerina resulta num aumento desta retenção.

A diminuição do diâmetro da coluna provoca um aumento na retenção. Observa-se igualmente que os resultados experimentais são sistematicamente inferiores aos previstos por Nicklin et al para regime laminar excepto para a solução menos viscosa (0,007 Pa.s).

Comparando a taxa de retenção para as diversas viscosidades com taxas de retenção estudadas anteriormente por outros autores, em que se utilizava razões de submersão superiores, verificou-se que a taxa de retenção para o mesmo caudal de gás injectado aumentou. O efeito da diminuição da taxa de submersão foi mais significativo na coluna de 32 mm com a solução mais viscosa (0,52 Pa.s) obtendo-se, em termos absolutos, aumentos entre cerca de 0,03 e 0,06, correspondendo a aumentos entre cerca de 42% e 52%. Conclui-se então que a variação da taxa de submersão (0,91 e 0,935 para 0,838) foi suficiente para ter influência sobre este parâmetro hidrodinâmico.

Quanto ao outro parâmetro hidrodinâmico estudado, a velocidade superficial do líquido em escoamento, verifica-se que esta aumenta com o aumento do caudal injectado na coluna. A diminuição da viscosidade das soluções faz com que haja um aumento na velocidade de circulação do líquido, sendo este efeito mais pronunciado nas soluções menos viscosas. Observa-se ainda o aumento significativo da velocidade superficial do líquido com a diminuição do diâmetro da coluna de borbulhamento. Analisando o efeito da diminuição da razão de submersão, verifica-se que esta provoca uma diminuição da velocidade do líquido.

Relativamente ao estudo efectuado para analisar a possibilidade de concentrar até 99,5% v/v em glicerina as soluções aquosas de glicerina mais diluídas existentes em grande quantidade no laboratório verificou que não foi possível concentrar as soluções acima de 98% (ver apêndice C) com os métodos utilizados e de uma forma economicamente viável. O custo da energia associado à produção de 1 kg de glicerina a 98% é superior ao preço por kg de soluções de glicerina 99,5% v/v existentes no mercado.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Para futuros trabalhos seria interessante operar a coluna com recirculação externa do líquido por borbulhamento com uma taxa de submersão intermédia entre as que já foram estudadas (entre 0,85 e 0,91) de modo a melhor quantificar a influência da razão de submersão sobre os parâmetros hidrodinâmicos estudados. Outro ponto que teria algum interesse seria a utilização de valores elevados para o caudal de gás injectado quando se utiliza a coluna de 32 mm e soluções menos viscosas, visto que para caudais baixos, o caudal de líquido recolhido era intermitente, ou até mesmo inexistente. Neste caso seria interessante recolher dados para caudais intermédios aos utilizados na experiência com as soluções menos viscosas (nomeadamente caudais de gás entre $7,75 \times 10^{-5}$ e $1,35 \times 10^{-4}$ m³/s), de modo a ter-se mais pontos para a construção e análise dos gráficos (quer retenção em função da velocidade de escoamento do líquido, quer o gráfico da velocidade de escoamento do líquido em função do caudal de gás injectado).

No futuro também se poderia estender este tipo de estudo a fluidos não Newtonianos de forma a alargar o conhecimento sobre o comportamento hidrodinâmico destas colunas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Akita,K., Nakanishi,O. E Tsuchiya,K. , 1994, “Turn around energy losses in an external-loop airlift reactors. Chem.Eng.Sci, 49,15,pp 2521-2533
- (2) Campos,J.B.L.M. e Guedes de Carvalho,J.R.F. 1988. “an experimental study of the wake of gas slugs rising in liquids”, J.Fluid Mech., 196, pp 27-37
- (3) Chisti,M.Y., Halard,B. e Moo-Young,M. 1988. “Liquid circulation in air-lift reactors”. Chem.Engng.Sci. 43, pp 451-457
- (4) Collins,R., De Moraes,F.F., Davidson,J.F. e Harrison,D. 1978. “The motion of large gas bubbles rising through liquid flowing in a tube”, J.Fluid Mech., 89, pp 497-514
- (5) Davidson,J.F. e Harrison,D. 1963. “Fluidised Particles”. Cambridge University Press.
- (6) Davies,R.M. e Taylor,G.Y. 1950. “The mechanics of large bubbles rising through extended liquid in tubes”, Proc.Roy.Soc.,A200, pp375-390
- (7) Dukler,A.E., Maron,D.M. e Brauner,N. 1985. “ A physical model for predicting the minimum stable slug length”, Chem. Eng.Sci., 40,pp 1379-1385
- (8) Dumitrescu,D.T.. 1943. “Strömung na ainer luftblase im senkrechten Rohr”, Z. Angew Math Mech.,23,pp 139-149
- (9) Fulford,G.D.,1964, “The flow of liquids in thin films”. Adv.Chem.Eng.,5,pp 151-236
- (10) Mayor,T.S., Ferreira,V., Pinto,A.M.F.R. e Campos,J.B.L.M. 2007. “Hydrodynamics of gas-liquid slug flow along vertical pipes in turbulent regime. An experimental study”, Int.J.Heat Fluid Flow,29,4,pp 1039-1053
- (11) Mayor,T.S., Pinto,A.M.F.R. e Campos,J.B.L.M. 2007. “Hydrodynamics of gas-liquid slug flow along vertical pipes in the laminar regime. Experimental and Simulation study”, Ind.Eng.Chem.Res.,46, pp 3794-3809
- (12) Merchuck,J.C. e Berzin,I. 1995. “Distribution of energy dissipation in air-lift reactors”.Chem.Eng.Sci.,50, pp 2225-2233.
- (13) Merchuck,J.C. e Stein,Y. 1981. “Local hold-up and liquid velocity in air-lift reactors”. A.I.Ch.E. 27, pp 377-388
- (14) Moissis,R. e Griffirith,P. 1962. “Entrance effects in a two-phase slug flow”.J.Heat Trans.,84,pp 29-39.
- (15) Nicklin, D.J.O. e Davidson,J.F. 1962. “Two-phase flow in vertical tubes”.Trans.Instn.Chem.Engrs.,40,pp 61-68.
- (16) Pereira,J., Rios,D. e Monteiro,R. 2007, “Estudo hidrodinâmico de uma coluna de recirculação externa de líquido por borbulhamento para várias razões de submersão”. Relatório de Laboratórios II, Engenharia Química, ISEP

- (17) Pinto,A.M.F.R., Coelho Pinheiro,M.N. e Campos,J.B.L.M. 1998, “Coalescence of two gas slugs rising in a co-current flowing liquid in vertical tubes”.Chem.Eng.Sci.,53,16,pp 2973-2983
- (18) Pinto,A.M.F.R., Coelho Pinheiro,M.N. Nogueira,S. e Campos,J.B.L.M. 2001, “on the transition from laminar to turbulent regime in vertical upward two-phase slug flow”, Experiments in fluids,31,pp 643-652.
- (19) Rangel A. 2008. “Estudo hidrodinâmico de uma coluna de recirculação de líquido por borbulhamento através de um tubo exterior”. Tese de mestrado apresentada no Instituto Superior de Engenharia do Porto”.
- (20) Santos,M.E.M. 2004. “Estudo hidrodinâmico de uma coluna de recirculação de líquido por borbulhamento através de um tubo interior”. Tese de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia do Porto.
- (21) Santos,R.2005. “Estudo hidrodinâmico de uma coluna de recirculação externa de líquido por borbulhamento”, Relatório de Laboratórios de Tecnologia Ambiental III, Engenharia Química, ISEP.
- (22) Segur,J.B.e Oberstar,H.E. 1951. “Viscosity of Glycerol and its Aqueous Solutions”, Industrial and Engineering Chemistry. Setembro, pp 2117-2120
- (23) Sena Esteves,M.T.M. 1998 “Caracterização hidrodinâmica e transferência de massa em sistema gás-líquido com bolhas tubulares”. Tese de doutoramento apresentada à Faculdade de Engenharia do Porto.
- (24) White,E.T. e Beardmore,R.H. 1962. “The velocity of single cylindrical air bubbles through liquids contained in vertical tubes”. Chem.Eng.Sci., 17, pp 351-361
- (25) Young,A.Y., Carbonell,R.G. e Ollis,D.F. 1991. “Airlift reactors: analysis of two-phase hydrodynamics” A.I.Ch.E.Journal,37, pp 601-607.

Apêndice A

Apêndice A - Cálculo de incertezas

A.1 Método

No presente trabalho foram calculadas as incertezas associadas às determinações efectuadas, quer sejam experimentais quer calculadas a partir de equações. O método utilizado foi o método da raiz quadrada da soma dos quadrados, definida pela seguinte equação.

$$U_x = (B_x^2 + P_x^2)^{1/2} \quad (\text{A.1})$$

Sendo: U_x a incerteza global da grandeza x ;

B_x a incerteza sistemática da grandeza x ;

P_x a incerteza de precisão da grandeza x .

As incertezas estão associadas a grandezas dadas por funções, em que todas elas são independentes umas das outras. Deste modo é dada por uma função r :

$$R = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (\text{A.2})$$

A incerteza global de r , foi obtida da seguinte forma:

$$U_r = \left[\left(\frac{\partial r}{\partial x_1} U_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial x_2} U_{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial r}{\partial x_n} U_{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.3})$$

Em que U_{x_1} , U_{x_2} e U_{x_n} são calculados a partir da expressão A.1. Todas as incertezas individuais (x_1 , x_2 e x_n) foram determinadas com o nível de confiança de 95%.

A incerteza sistemática, B , corresponde a metade da menor divisão do aparelho de medida. A incerteza de precisão, P , foi calculada a partir da expressão A.4.

$$P_x = t \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.4})$$

Na tabela A.1 sistematizam-se os erros dos equipamentos associados a todas as grandezas determinadas experimentalmente.

Tabela A.1 – Erros dos equipamentos utilizados nas determinações das grandezas experimentais.

Grandeza	Erro	Unidade	Instrumento
L_G	5×10^{-4}	m	Fita métrica
L_C	5×10^{-4}	m	Fita métrica
M	5×10^{-4}	kg	Balança
t	0,0005	s	Cronómetro
Vol	50×10^{-3}	m^3	Proveta
Q_G	5×10^{-7}	m^3/s	Rotâmetro

De seguida, apresenta-se o método a aplicar para os diversos parâmetros determinados experimentalmente.

A.2 Retenção experimental

Obteve-se a retenção medindo com uma fita métrica a altura que o gás ocupava na coluna interna e sabendo a altura total da coluna:

$$\varepsilon_{\text{exp}} = \frac{L_G}{L_C} \quad (\text{A.5})$$

Para estas alturas a incerteza sistemática é dada por:

$$B_{L_G} = B_{L_C} = \frac{0,1}{2} = 0,05 \text{ cm} \quad (\text{A.6})$$

O desvio padrão da medição da altura da coluna, L_C , foi nulo, conseqüentemente a incerteza de precisão foi considerada desprezável. A incerteza pode ser calculada através da equação:

$$U\varepsilon_{\text{exp}} = \left[\left(\frac{\partial \varepsilon_{\text{exp}}}{\partial L_G} UL_G \right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_{\text{exp}}}{\partial L_C} UL_C \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.7})$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{\text{exp}}}{\partial L_G} = \frac{1}{L_C} \quad (\text{A.8})$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{\text{exp}}}{\partial L_C} = -\frac{L_G}{L_C^2} \quad (\text{A.9})$$

A.3 Caudal volumétrico de líquido

O caudal volumétrico de líquido foi determinado a partir do caudal mássico. O método é descrito na secção 3.4.2 . Várias massas de líquido eram recolhidas à medida que se cronometrava o tempo. A massa recolhida era pesada numa balança digital.

O caudal mássico, Q_M , é dado pelo quociente entre a massa de líquido recolhida, m , num dado tempo, t . As medições (massa e tempo) têm associadas incertezas sistemáticas diferentes. Porém o cálculo das incertezas de precisão foi o mesmo. Isto deve-se ao facto da medição do caudal não depender directamente da precisão de cada grandeza isolada, mas do quociente. Assim temos que a incerteza associada ao caudal mássico é dada pela expressão abaixo.

$$B_{Q_M} = \left[\left(\frac{\partial Q_M}{\partial m} B_m \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_M}{\partial L_G} B_t \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.10})$$

$$\frac{\partial Q_M}{\partial m} = \frac{1}{t} \quad (\text{A.11})$$

$$\frac{\partial Q_M}{\partial t} = -\frac{m}{t^2} \quad (\text{A.12})$$

A incerteza de precisão é dada pela equação A.4 em que o desvio padrão corresponde aos vários caudais mássicos medidos para caudal de gás injectado.

O caudal volumétrico é obtido pela razão entre o caudal mássico e a massa volúmica do líquido, sendo este valor tabelado, e portanto considera-se com incerteza nula.

$$UQ_L = \left[\left(\frac{\partial Q_L}{\partial Q_M} UL_G \right)^2 \right]^{1/2} = \frac{UQ_M}{\rho} \quad (\text{A.13})$$

A.4 Velocidade do líquido

Sabendo que a velocidade superficial do líquido é dada pela expressão:

$$v_L = \frac{Q_G + Q_L}{A_C} \quad (\text{A.14})$$

Podemos calcular a incerteza de v_L

$$Uv_L = \left[\left(\frac{\partial v_L}{\partial Q_G} U_{Q_G} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_L}{\partial Q_L} U_{Q_L} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_L}{\partial A_C} U_{A_C} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.15})$$

Pelo facto de se ser considerado um valor constante não possuindo erro, a incerteza associada à área da coluna é nula. Assim o ultimo termo do segundo membro da equação anterior é nulo.

A.5 Velocidade teórica de uma bolha tubular

Partindo da expressão para o cálculo da velocidade teórica;

$$v_s = cv_L + \alpha \sqrt{gD} \quad (\text{A.16})$$

Nesta expressão temos que c , g , D e α são constantes, e por isso não têm incertezas associadas. O valor de α foi obtido de um gráfico.

$$Uv_s = \left[\left(\frac{\partial v_s}{\partial v_L} Uv_L \right)^2 \right]^{1/2} = cUv_L \quad (\text{A.17})$$

A.6 Retenção teórica

A retenção teórica é dada pela equação:

$$\varepsilon = \frac{Q_G}{A_C \times v_s} \quad (\text{A.18})$$

A partir da expressão podemos verificar depende de parâmetros determinados experimentalmente, como o caudal de gás injectado, Q_G , e da velocidade das bolhas tubulares, v_s . Considerando as incertezas das áreas desprezáveis.

$$U\varepsilon = \left[\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial Q_G} U Q_G \right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial v_s} U v_s \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.19})$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial Q_G} = \frac{1}{A_C \times v_s} \quad (\text{A.20})$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial v_s} = - \frac{Q_G}{A_C \times v_s^2} \quad (\text{A.21})$$

A.7 Valor do parâmetro c experimental

Uma das determinações efectuadas foi a determinação da constante c, de forma a comparar com valores definidos por modelos que definem c igual a 2 em regime laminar e igual a 1,2 em regime turbulento. Assim temos a equação:

$$C_{\text{exp}} = \frac{\frac{Q_G}{\varepsilon \times A_C} - a\sqrt{gD}}{v_L} \quad (\text{A.22})$$

Para C_{exp} a incerteza global é dada pela equação

$$c_{\text{exp}} = \left[\left(\frac{\partial c_{\text{exp}}}{\partial Q_G} U Q_G \right)^2 + \left(\frac{\partial c_{\text{exp}}}{\partial \varepsilon_{\text{exp}}} U \varepsilon_{\text{exp}} \right)^2 + \left(\frac{\partial c_{\text{exp}}}{\partial v_L} U v_L \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.23})$$

Onde

$$\frac{\partial c_{\text{exp}}}{\partial Q_G} = \frac{1}{A \varepsilon v_L} \quad (\text{A.24})$$

$$\frac{\partial c_{\text{exp}}}{\partial \varepsilon_{\text{exp}}} = - \frac{Q_G}{A \varepsilon^2 v_L} \quad (\text{A.25})$$

$$\frac{\partial c_{\text{exp}}}{\partial v_L} = - \frac{A \alpha \varepsilon \sqrt{gd} - Q_G}{A \varepsilon^2 v_L} \quad (\text{A.26})$$

A.8 Velocidade relativa do líquido

A velocidade relativa do líquido é calculada a partir da equação A.31

$$V = (c_{\text{exp}} - 1) \times v_L + \alpha \sqrt{gD} \quad (\text{A.31})$$

Sendo a incerteza global obtida através da equação:

$$U_V = \left[\left(\frac{\partial V}{\partial c_{\text{exp}}} U_{c_{\text{exp}}} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial v_L} U_{v_L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.32})$$

$$\frac{\partial V}{\partial c_{\text{exp}}} = v_L \quad (\text{A.33})$$

$$\frac{\partial V}{\partial v_L} = c - 1 \quad (\text{A.34})$$

A.9 Número de Reynolds do líquido em escoamento

O número de Reynolds do líquido é calculado pela expressão:

$$\text{Re}_{v_L} = \frac{\rho v_L D}{\mu} \quad (\text{A.35})$$

A incerteza do Reynolds do líquido é calculada pela expressão A.36

$$U \text{Re}_{v_L} = \left[\left(\frac{\partial \text{Re}_{v_L}}{\partial \rho} U_\rho \right)^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}_{v_L}}{\partial D} U_D \right)^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}_{v_L}}{\partial \mu} U_\mu \right)^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}_{v_L}}{\partial v_L} U_{v_L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.36})$$

Tendo em conta que os valores de ρ, μ e D são constantes, e por isso não possuem incertezas associadas, o valor da incerteza de $U \text{Re}_{v_L}$ será dada pela expressão:

$$U \text{Re}_{v_L} = \left[\left(\frac{\partial \text{Re}_{v_L}}{\partial v_L} U_{v_L} \right)^2 \right]^{1/2} = \frac{\rho D}{\mu} U_{v_L} \quad (\text{A.37})$$

A.10 Número de Reynolds na esteira das bolhas tubulares

O número de Reynolds na esteira das bolhas tubulares é calculado pela expressão:

$$\text{Re}_V = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (\text{A.38})$$

A incerteza do Reynolds do líquido é calculada pela expressão A.39

$$U \text{Re}_V = \left[\left(\frac{\partial \text{Re}_V}{\partial \rho} U_\rho \right)^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}_V}{\partial D} U_D \right)^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}_V}{\partial \mu} U_\mu \right)^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}_V}{\partial V} U_V \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.39})$$

Tendo em conta que os valores de ρ, μ e D são constantes, e por isso não possuem incertezas associadas, o valor da incerteza de $U \text{Re}_V$ será dada pela expressão:

$$U \text{Re}_V = \left[\left(\frac{\partial \text{Re}_V}{\partial V} U_V \right)^2 \right]^{1/2} = \frac{\rho D}{\mu} U_V \quad (\text{A.40})$$

Apêndice

B

Apêndice B - Resultados obtidos

São apresentados os valores experimentais e calculados das variáveis estudadas durante a realização das experiências.

Nas tabelas B.1 e B.2 são apresentados os valores da retenção determinados experimentalmente e os valores previstos para os regimes do escoamento no líquido laminar e turbulento a partir da equação de Nicklin em que a velocidade das bolhas é calculada a partir da equação 2.7 sendo c igual a 2 para regime laminar e c igual a 1,2 para regime turbulento.

Na tabela B.3 são apresentados os valores calculados das incertezas da velocidade do líquido em escoamento, da retenção experimental e retenção teórica para regime laminar ($c=2,0$) e regime turbulento ($c=1,2$) utilizando a coluna de 22 mm de diâmetro interno.

Na tabela B.4 são apresentados os valores calculados das incertezas da velocidade do líquido em escoamento, da retenção experimental e retenção teórica para regime laminar ($c=2,0$) e regime turbulento ($c=1,2$) utilizando a coluna de 32 mm de diâmetro interno.

Na tabela B.5 são apresentados os valores calculados das incertezas do número de Reynolds para o líquido em escoamento, Re_{vL} , para o número de Reynolds baseado na esteira das bolhas tubulares, Re_v , e da constante c_{exp} para a utilizando a coluna de 22 mm de diâmetro interno.

Na tabela B.6 são apresentados os valores calculados das incertezas do número de Reynolds para o líquido em escoamento, Re_{vL} , para o número de Reynolds baseado na esteira das bolhas tubulares, Re_v , e da constante c_{exp} para a utilizando a coluna de 32 mm de diâmetro interno.

Tabela B.1 – Valores experimentais e calculados na representação dos gráficos respeitantes à retenção na coluna de 22 mm de diâmetro interno.

ρ (kg/m ³)	μ (Pa.s)	$Q_g \cdot 10^6$ (m ³ /s)	$Q_L \cdot 10^6$ (m ³ /s)	v_L (m/s)	ϵ (experimental)	ϵ (c=1,2)	ϵ (c=2,0)
1250	0,520	15,0	14,0	0,076	0,130	0,221	0,164
		34,5	28,6	0,166	0,177	0,317	0,216
		57,5	37,6	0,250	0,215	0,390	0,257
		77,5	49,5	0,334	0,245	0,418	0,270
		135,0	57,6	0,507	0,272	0,511	0,323
1235	0,274	15,0	18,3	0,087	0,119	0,180	0,137
		34,5	38,6	0,192	0,162	0,264	0,182
		57,5	57,8	0,303	0,176	0,317	0,210
		77,5	68,2	0,383	0,207	0,355	0,232
		87,5	71,0	0,417	0,211	0,375	0,243
135,0	81,4	0,569	0,240	0,446	0,284		
1209	0,066	15,0	22,7	0,099	0,101	0,145	0,112
		34,5	61,3	0,252	0,125	0,199	0,138
		57,5	89,7	0,387	0,148	0,245	0,163
		77,5	110,0	0,493	0,158	0,274	0,179
		87,5	117,4	0,539	0,173	0,288	0,187
135,0	136,5	0,714	0,200	0,352	0,225		
1207	0,053	15,0	21,6	0,096	0,101	0,149	0,115
		34,5	64,3	0,260	0,124	0,197	0,136
		57,5	96,0	0,404	0,140	0,239	0,158
		77,5	118,6	0,516	0,165	0,265	0,173
		87,5	126,0	0,562	0,173	0,280	0,181
135,0	149,3	0,748	0,198	0,339	0,216		
1133	0,007	15,0	16,4	0,083	0,122	0,152	0,121
		34,5	82,1	0,307	0,134	0,172	0,117
		57,5	129,9	0,493	0,155	0,201	0,132
		77,5	155,5	0,613	0,171	0,228	0,147
		87,5	177,1	0,696	0,182	0,231	0,148
135,0	216,3	0,924	0,208	0,280	0,177		

Tabela B.2 – Valores experimentais e calculados na representação dos gráficos

ρ (kg/m ³)	μ (Pa.s)	$Q_g * 10^6$ (m ³ /s)	$Q_L * 10^6$ (m ³ /s)	v_L (m/s)	ϵ (experimental)	ϵ (c=1,2)	ϵ (c=2,0)
1248	0,520	15,0	5,6	0,026	0,088	0,111	0,099
		34,5	37,6	0,090	0,113	0,175	0,136
		57,5	61,0	0,147	0,138	0,228	0,166
		77,5	86,8	0,204	0,144	0,252	0,177
		87,5	97,4	0,230	0,155	0,263	0,182
		135,0	115,7	0,312	0,179	0,328	0,221
1237	0,278	15,0	2,1	0,021	0,086	0,102	0,094
		34,5	43,3	0,097	0,102	0,157	0,122
		57,5	77,8	0,168	0,120	0,199	0,145
		77,5	107,7	0,230	0,130	0,222	0,156
		87,5	117,5	0,255	0,137	0,235	0,163
		135,0	147,4	0,351	0,157	0,290	0,195
1210	0,065	34,5	40,5	0,093	0,102	0,141	0,113
		57,5	94,0	0,188	0,112	0,171	0,125
		77,5	137,7	0,268	0,120	0,187	0,132
		87,5	149,7	0,295	0,124	0,199	0,139
		135,0	196,3	0,412	0,134	0,244	0,165
1207	0,052	34,5	36,4	0,088	0,103	0,143	0,116
		57,5	94,3	0,189	0,108	0,170	0,125
		77,5	141,2	0,272	0,113	0,185	0,131
		87,5	157,7	0,305	0,122	0,195	0,136
		135,0	205,7	0,424	0,141	0,239	0,161
1134	0,00702	34,5	15,5	0,062	0,123	0,160	0,135
		57,5	93,5	0,188	0,129	0,171	0,126
		77,5	157,0	0,292	0,132	0,177	0,124
		87,5	179,1	0,331	0,138	0,184	0,127
		135,0	254,2	0,484	0,149	0,217	0,145

Tabela B.3 –Valores das incertezas da retenção experimental para regime laminar e turbulento na coluna de 22 mm de diâmetro interno.

μ (Pa.s)	v_L (m/s)	U_{v_L} (m/s)	ϵ	U_ϵ	$\epsilon_{(c=2,0)}$	$U_{\epsilon(c=2,0)}$	$\epsilon_{(c=1,2)}$	$U_{\epsilon(c=1,2)}$
0,520	0,076	0,0014	0,130	0,0016	0,164	0,0058	0,221	0,0076
	0,166	0,0014	0,177	0,0027	0,216	0,0035	0,317	0,0050
	0,250	0,0016	0,215	0,0038	0,257	0,0026	0,390	0,0039
	0,334	0,0016	0,245	0,0018	0,270	0,0021	0,418	0,0031
	0,366	0,0015	-----	-----	0,281	0,0019	0,438	0,0029
	0,507	0,0019	0,272	0,0061	0,323	0,0016	0,511	0,0026
0,274	0,088	0,0015	0,119	0,0003	0,137	0,0048	0,180	0,0062
	0,192	0,0015	0,162	0,0005	0,182	0,0029	0,264	0,0041
	0,303	0,0016	0,176	0,0010	0,210	0,0021	0,317	0,0030
	0,383	0,0019	0,207	0,0009	0,232	0,0018	0,355	0,0027
	0,417	0,0022	0,211	0,0009	0,243	0,0018	0,375	0,0027
	0,569	0,0019	0,240	0,0028	0,284	0,0014	0,446	0,0021
0,066	0,099	0,0016	0,101	0,0018	0,112	0,0039	0,145	0,0049
	0,252	0,0016	0,125	0,0042	0,138	0,0021	0,199	0,0030
	0,387	0,0021	0,148	0,0025	0,163	0,0016	0,245	0,0023
	0,493	0,0030	0,158	0,0015	0,179	0,0015	0,274	0,0022
	0,539	0,0028	0,173	0,0019	0,187	0,0014	0,288	0,0020
	0,714	0,023	0,200	0,0007	0,225	0,0066	0,352	0,0096
0,053	0,096	0,0018	0,101	0,0019	0,115	0,0040	0,149	0,0051
	0,260	0,0021	0,124	0,0044	0,136	0,0021	0,197	0,0030
	0,404	0,0019	0,140	0,0008	0,158	0,0015	0,239	0,0023
	0,516	0,0023	0,165	0,0051	0,173	0,0013	0,265	0,0020
	0,562	0,0069	0,173	0,0048	0,181	0,0022	0,280	0,0032
	0,748	0,0055	0,198	0,0034	0,216	0,0016	0,339	0,0025
0,007	0,083	0,0015	0,122	0,0027	0,121	0,0042	0,152	0,0052
	0,307	0,0030	0,134	0,0039	0,117	0,0019	0,172	0,0027
	0,493	0,0027	0,155	0,0040	0,132	0,0013	0,201	0,0020
	0,613	0,0117	0,171	0,0027	0,147	0,0027	0,228	0,0039
	0,696	0,0057	0,182	0,0039	0,148	0,0014	0,231	0,0021
	0,924	0,0186	0,208	0,0069	0,177	0,0033	0,280	0,0050

Tabela B.4 –Valores das incertezas da retenção experimental para regime laminar e turbulento na coluna de 32 mm de diâmetro interno.

μ (Pa.s)	v_L (m/s)	U_{v_L} (m/s)	ε	U_ε	$\varepsilon_{(c=2,0)}$	$U_{\varepsilon(c=2,0)}$	$\varepsilon_{(c=1,2)}$	$U_{\varepsilon(c=1,2)}$
0,520	0,026	0,0006	0,088	0,0008	0,099	0,0034	0,111	0,0037
	0,090	0,0007	0,113	0,0013	0,136	0,0021	0,175	0,0026
	0,147	0,0008	0,138	0,0010	0,166	0,0016	0,228	0,0021
	0,204	0,0009	0,144	0,0022	0,176	0,0013	0,252	0,0018
	0,230	0,0010	0,155	0,0018	0,182	0,0012	0,263	0,0017
	0,312	0,0015	0,179	0,0020	0,221	0,0012	0,328	0,0017
0,278	0,021	0,0007	0,086	0,0009	0,094	0,0032	0,102	0,0034
	0,097	0,0007	0,102	0,0020	0,122	0,0018	0,157	0,0023
	0,168	0,0021	0,120	0,0017	0,145	0,0018	0,199	0,0022
	0,230	0,0020	0,130	0,0019	0,156	0,0014	0,222	0,0019
	0,255	0,0015	0,137	0,0019	0,163	0,0012	0,235	0,0016
	0,351	0,0022	0,157	0,0055	0,195	0,0012	0,290	0,0017
0,066	0,093	0,0011	0,101	0,0016	0,113	0,0018	0,141	0,0021
	0,188	0,0018	0,112	0,0019	0,125	0,0014	0,170	0,0017
	0,268	0,0026	0,120	0,0015	0,132	0,0013	0,187	0,0017
	0,295	0,0028	0,124	0,0030	0,139	0,0013	0,199	0,0017
	0,412	0,0021	0,134	0,0059	0,165	0,0009	0,244	0,0013
0,053	0,088	0,0009	0,103	0,0028	0,116	0,0079	0,144	0,0049
	0,189	0,0034	0,108	0,0014	0,125	0,0311	0,170	0,0106
	0,272	0,0016	0,113	0,0018	0,131	0,0190	0,186	0,0064
	0,305	0,0026	0,122	0,0030	0,136	0,0313	0,195	0,0096
	0,424	0,0059	0,141	0,0031	0,161	0,0767	0,239	0,0211
0,007	0,062	0,0007	0,123	0,0017	0,135	0,0020	0,160	0,0024
	0,188	0,0012	0,129	0,0009	0,126	0,0012	0,171	0,0016
	0,292	0,0055	0,132	0,0015	0,124	0,0019	0,177	0,0024
	0,332	0,0067	0,138	0,0033	0,127	0,0021	0,184	0,0027
	0,484	0,0064	0,149	0,0019	0,145	0,0017	0,217	0,0023

Tabela B.5 - Valores das incertezas dos números de Reynolds, Re_v , Re_{vL} e da constante C_{exp} para os ensaios realizados com a coluna de 22 mm.

μ (Pa.s)	v_L (m/s)	V (m/s)	Re_{vL}	$U_{Re_{vL}}$	Re_v	U_{Re_v}	C_{exp}	$U_{C_{exp}}$
0,520	0,076	0,226	4,1	0,1	12	0,1	2,82	0,014
	0,166	0,346	8,7	0,1	18	0,1	2,56	0,003
	0,250	0,454	13	0,1	24	0,1	2,46	0,002
	0,334	0,498	18	0,1	27	0,1	2,23	0,001
	0,365	-----	20	0,1	-----	----	-----	-----
	0,507	0,798	27	0,1	42	0,2	2,40	0,002
0,274	0,088	0,244	8,8	0,2	25	0,2	2,49	0,012
	0,192	0,368	19	0,1	37	0,2	2,32	0,001
	0,303	0,558	30	0,2	55	0,2	2,47	0,001
	0,383	0,601	38	0,2	59	0,2	2,27	0,001
	0,417	0,675	41	0,2	66	0,3	2,35	0,001
	0,569	0,909	57	0,2	90	0,3	2,40	0,001
0,066	0,099	0,293	40	0,6	118	0,9	2,41	0,015
	0,252	0,476	100	0,6	189	0,9	2,28	0,006
	0,387	0,638	156	0,8	257	1,1	2,25	0,001
	0,493	0,794	196	1,2	315	1,6	2,30	0,001
	0,539	0,795	217	1,1	320	1,4	2,19	0,001
	0,714	1,063	292	9,3	435	11,9	2,27	0,004
0,053	0,096	0,296	48	0,9	148	1,4	2,52	0,018
	0,260	0,473	130	1,0	237	1,4	2,24	0,006
	0,404	0,676	199	1,0	333	1,3	2,30	0,001
	0,516	0,721	258	1,1	361	1,8	2,11	0,003
	0,562	0,771	281	3,5	386	4,0	2,11	0,003
	0,748	1,042	368	2,7	513	3,5	2,19	0,001
0,007	0,083	0,241	296	5,4	860	5,3	1,97	0,018
	0,307	0,373	1102	10,6	1340	8,6	1,69	0,003
	0,493	0,484	1739	9,5	1707	9,3	1,66	0,002
	0,613	0,581	2173	41,5	2060	29,1	1,69	0,001
	0,696	0,566	2472	20,2	2009	15,2	1,58	0,001
	0,924	0,780	3277	65,9	2764	49,7	1,67	0,003

Tabela B.6 - Valores das incertezas dos números de Reynolds, Re_v , Re_{vL} e da constante C_{exp} para os ensaios realizados com a coluna de 32 mm.

μ (Pa.s)	v_L (m/s)	V(m/s)	Re_{vL}	$U_{Re_{vL}}$	Re_v	U_{Re_v}	C_{exp}	$U_{C_{exp}}$
0,520	0,026	0,186	1,9	0,1	14	0,1	2,89	0,097
	0,090	0,290	7,0	0,1	23	0,1	2,70	0,004
	0,147	0,370	11	0,1	28	0,1	2,58	0,001
	0,204	0,464	15	0,1	35	0,1	2,60	0,002
	0,230	0,473	18	0,1	37	0,1	2,46	0,001
	0,312	0,627	24	0,1	48	0,2	2,57	0,001
0,278	0,021	0,195	3,0	0,1	28	0,2	2,78	0,219
	0,097	0,322	14	0,1	46	0,2	2,71	0,007
	0,168	0,425	24	0,3	61	0,5	2,60	0,003
	0,230	0,510	33	0,3	72	0,4	2,53	0,002
	0,255	0,540	37	0,2	78	0,3	2,50	0,001
	0,351	0,719	51	0,3	104	0,6	2,60	0,006
0,065	0,093	0,292	56	0,6	199	0,9	2,45	0,006
	0,188	0,411	114	1,1	271	1,5	2,35	0,003
	0,268	0,500	159	1,6	319	2,0	2,28	0,001
	0,295	0,543	176	1,7	345	2,3	2,31	0,003
	0,412	0,801	242	1,3	491	2,4	2,56	0,009
	0,088	0,327	66	0,7	242	1,1	2,51	0,012
0,052	0,189	0,473	140	2,5	352	3,7	2,48	0,003
	0,272	0,579	198	1,2	422	1,7	2,42	0,002
	0,304	0,585	226	1,9	434	2,6	2,28	0,003
	0,424	0,766	315	4,4	569	6,0	2,35	0,003
	0,062	0,287	319	5,3	1472	5,3	2,50	0,008
0,007	0,188	0,366	961	5,7	1881	5,7	1,92	0,001
	0,292	0,438	1504	24,0	2250	24,0	1,84	0,002
	0,332	0,455	1712	27,9	2339	27,9	1,79	0,003
	0,484	0,642	2517	31,4	3297	31,4	1,93	0,001

Apêndice

C

Apêndice C- Recuperação de glicerina

Neste apêndice são apresentados os resultados referentes ao estudo da possibilidade de concentrar até 99,5% v/v em glicerina as soluções aquosas de glicerina mais diluídas existentes em grande quantidade no laboratório onde este trabalho foi realizado. Foram realizados ensaios utilizando três métodos distintos:

- ✓ Utilização de um tanque com aquecimento por meio de uma resistência eléctrica;
- ✓ Utilização de rotavapor;
- ✓ Utilização de manta de aquecimento.

C.1 -Utilização de um tanque com aquecimento por meio de uma resistência eléctrica

A utilização de tanque de aquecimento era um processo demorado, visto que era necessário vários dias para se proceder à evaporação da água existente nas soluções de glicerina. Realizaram-se vários ensaios utilizando este método.

Este método não resultou em grande parte devido ao facto do sistema termostaticado do tanque de aquecimento não permitir ultrapassar os 100 °C.

Na figura que se segue apresentam-se os resultados da concentração em glicerina em função do tempo de aquecimento obtidos num ensaio realizado ao longo de sete dias. Em cada dia realizou-se uma etapa de aquecimento contínua que variou entre 3 h a 6h. No final de cada etapa de aquecimento a solução era isolada de forma a evitar a alteração da respectiva concentração até ao início da próxima etapa, no dia seguinte.

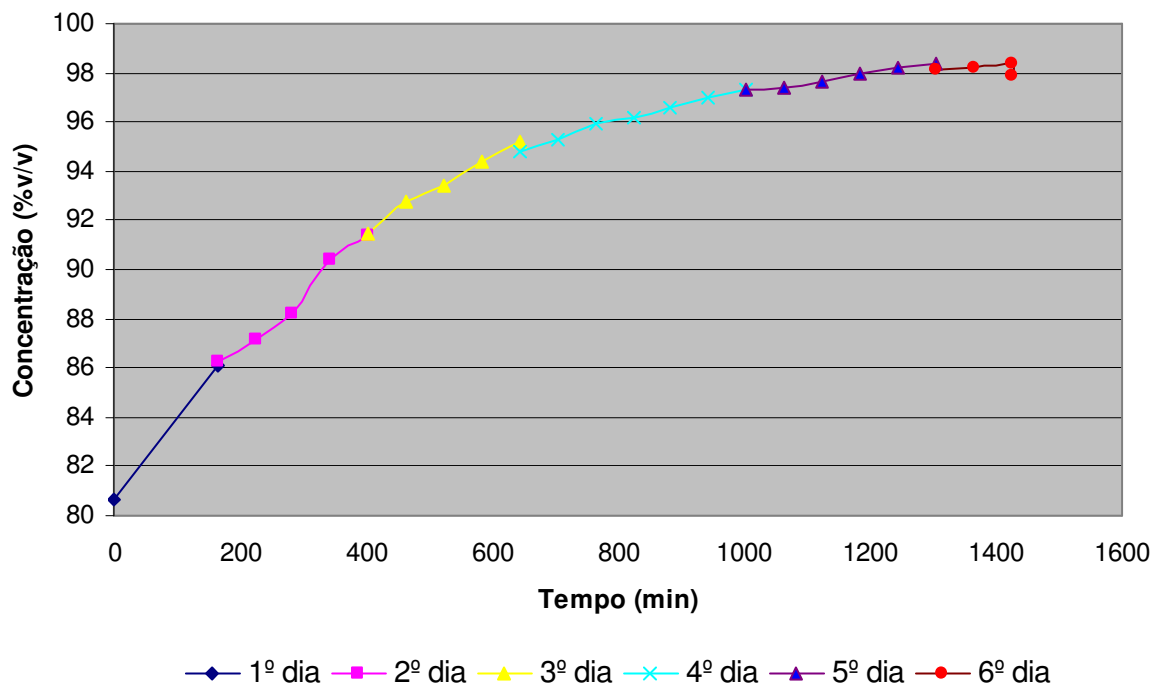


Gráfico C1 – Variação da concentração da solução de glicerina em função do tempo de aquecimento para cada um dos dias.

Os resultados apresentados evidenciam a necessidade de um elevado tempo para concentrar a solução, especialmente a partir da concentração da ordem de 96%. De referir ainda que quando a solução atingia esta concentração adquiria uma coloração amarelada.

De salientar ainda que o método não compensa devido ao facto de não se conseguir concentrar a solução pretendida, pelo facto de que a partir de 98%, não ser possível concentrar a solução. A solução obtida possuía uma concentração de 98% e portanto inferior à concentração da solução existente no mercado (99,5%).

De referir que o custo da solução obtida é superior ao custo da solução existente no mercado (99,5%), conforme se pode verificar pela tabela C.1.

Tabela C.1 - Dados obtidos na recuperação da glicerina.

Tempo (h)	Energia gasta(J/kg)	Custo energia (€/kg)	Custo da solução (99,5%) no mercado ((€/kg)
23,73	4,95	1,32	1,19

C.2 - Utilização de um tanque com aquecimento por meio de Rotavapor

A utilização de rotavapor não se mostrou eficaz devido ao facto de não ser possível, com o equipamento existente no laboratório, atingir uma temperatura do banho de aquecimento suficientemente elevada e uma pressão de vácuo suficientemente baixa, de forma a ser possível uma eficiente separação da água da solução. Esta separação era eficaz até uma percentagem da ordem dos 87%, inferior à pretendida, sendo ineficaz a partir desse momento dado que não se conseguia retirar água da solução de glicerina.

C.3 -Utilização de manta de aquecimento

Foi utilizada uma manta de aquecimento para promover a evaporação da água existente na solução aquosa de glicerina.

Num primeiro ensaio a duração de aquecimento foi de cerca de 3 h tendo-se analisado a solução ao fim desse período. Verificou-se que a solução apresentava uma coloração castanha e opaca e que a respectiva viscosidade (1892 cp a 19,2°C) era superior à de uma solução de glicerina pura (1636 cp a 19,2°C), chegando-se então à conclusão que houve degradação da glicerina e portanto formação de outros compostos com maior viscosidade. A temperatura embora não tenha sido controlada ao longo do aquecimento, foi medida no final com um termopar que indicou ser superior a 200°C.

Quanto ao facto de que poderia ser eficaz, caso houvesse um controle de temperatura, pode ser visto pelos resultados de um 2º ensaio, onde se controlou a temperatura e mediu-se a concentração em amostras retiradas de 10 em 10 minutos. Com este procedimento conseguiu-se uma viscosidade de 1050 cp a 20°C, o que corresponde a uma concentração de 98,5%. A temperatura da solução atingiu a temperatura de 125°C, medidos com o termopar. Essa amostra foi retirada ao fim de 70 minutos.

Os ensaios realizados com a manta de aquecimento acabaram por não ser conclusivos pois se por um lado ao aumentar o tempo de aquecimento, e consequentemente a temperatura da solução, se poderia ter conseguido concentrar a solução até ao valor pretendido por outro lado não se determinou para que valor de temperatura é que começaria a ocorrer a degradação da solução de glicerina.

A utilização da manta de aquecimento seria eficaz se controlarmos a temperatura de modo a que não haja um sobreaquecimento da solução. Utilizando a manta de aquecimento existente no laboratório e realizando os ensaios, atingiu-se temperaturas muito elevadas, que fez com que houvesse uma evaporação total da água existente e a uma degradação total da glicerina. Não foi objecto de estudo determinar a substância formada após essa degradação. No entanto é de referir que a viscosidade encontrada era superior (1892 cp a 19,2°C) à de uma solução de glicerina pura (1636 cp a 19,2°C), chegando então à conclusão que houve formação de outros compostos com maior viscosidade.

Apêndice

D

Apêndice D – Viscosímetro de Haake

O viscosímetro de Haake era necessário para determinação da viscosidade das soluções menos viscosas. O Viscosímetro era ligado a um sistema de refrigeração/aquecimento.

A solução era colocada no viscosímetro e com um termopar. Era determinada, através de um picnómetro, a densidade da solução.

Com a esfera adequada media-se o tempo necessário para que a esfera se deslocasse através do líquido entre duas marcas do viscosímetro.

Com os valores da massa volúmica da solução que foi determinada, com a massa volúmica da esfera que é dada pela tabela do fabricante, com o tempo de deslocamento e com a constante da esfera utilizada lida em tabelas podemos calcular a viscosidade da solução através da fórmula:

$$\eta = t (P1-P2) k \text{ (mPa.s)}$$

em que

η – viscosidade (mPas)

t – tempo de deslocamento entre dois pontos

P1 – densidade do material da esfera utilizada

P2 – densidade da solução à temperatura de determinação da viscosidade

k – constante da esfera utilizada

Os resultados obtidos foram

Solução utilizada na coluna de 22 mm:

Massa volúmica da esfera utilizada – 2,216 g/cm³

densidade da solução – 1,144 g/cm³

k – 0,0567

temperatura – 23,4°C

Solução utilizada na coluna de 32 mm:

Massa volúmica da esfera utilizada – 2,216 g/cm³

densidade da solução – 1,149 g/cm³

k – 0,0567

temperatura – 24°C.

Tabela D.1 - Determinação da viscosidade pelo viscosímetro de Haake.

Solução coluna 22 mm		Solução Coluna 32 mm	
Tempo(s)	Viscosidade (mPa.s)	Tempo(s)	Viscosidade (mPa.s)
106,72	6,487	111,80	6,768
106,72	6,487	110,38	6,678
106,93	6,499	110,47	6,683
106,41	6,468	111,10	6,721
106,40	6,467	110,97	6,714
106,57	6,478	111,47	6,744
106,78	6,490	110,30	6,673
107,34	6,524	110,47	6,683
107,13	6,512	111,03	6,717
108,25	6,580	110,21	6,668

Com a média das viscosidades e com a temperatura determina-se a concentração.

Com a concentração determinava-se a temperatura necessária para que a solução tivesse uma viscosidade de 0,007 Pa.s, necessária para as experiências.