

## 7

### Resultados para Tubulações Inclínadas

Dando continuidade ao que foi apresentado no Capítulo 6, neste capítulo uma segunda configuração de tubulações é analisada, tendo por objetivo aumentar a abrangência dos testes realizados neste estudo. A geometria consiste de uma seção em “V” simétrica, com trechos descendente e ascendente de 21,34 m de comprimento e inclinação de  $\beta = -1,93^\circ$  e  $1,93^\circ$  com a horizontal, respectivamente, como ilustrado na Fig. 7.1a. A tubulação possui diâmetro  $D = 0,0508$  m. Para garantir uma transição suave entre as partes descendente e ascendente da seção, um pequeno trecho horizontal de 0,3 m é acrescentado. Esta configuração visa reproduzir a seção em “V” usada no estudo experimental de Al Safran et al. (2005).

Para investigar o efeito de pequenas inclinações nas características do regime de golfadas, as mesmas condições são testadas para casos em que a tubulação está na horizontal, Fig. 7.1b, e com inclinação descendente de  $-1,93^\circ$  (trecho único), Fig. 7.1c. O comprimento total  $L$  utilizado em todos os casos foi constante e igual a 42,98 m, portanto equivalente ao comprimento total da seção em “V” utilizada no referido estudo.

Inicialmente, a capacidade da metodologia em reproduzir as regiões dos mapas de padrões de escoamento para as quais os regimes estratificado e de golfadas se observam é ilustrada. A seguir, investiga-se a influência da inclinação na tubulação nos regimes de escoamento.

A mistura bifásica utilizada corresponde àquela dos estudos de Al Safran et al. (2005). A fase gasosa é formada pelo ar, com a constante de gás  $R$  igual a  $287 \text{ N m / (kg K)}$  e viscosidade absoluta  $\mu$  igual a  $1,796 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$ . Como fase líquida utilizou-se um óleo de massa específica  $\rho$  definida como  $890,6 \text{ kg/m}^3$ , e viscosidade absoluta  $\mu$  igual a  $1,02 \times 10^{-2} \text{ Pa.s}$ . A pressão na saída é mantida constante e igual à pressão atmosférica. O valor do *hold-up* de líquido inicial foi definido igual a 0,4, conforme discutido no capítulo anterior.

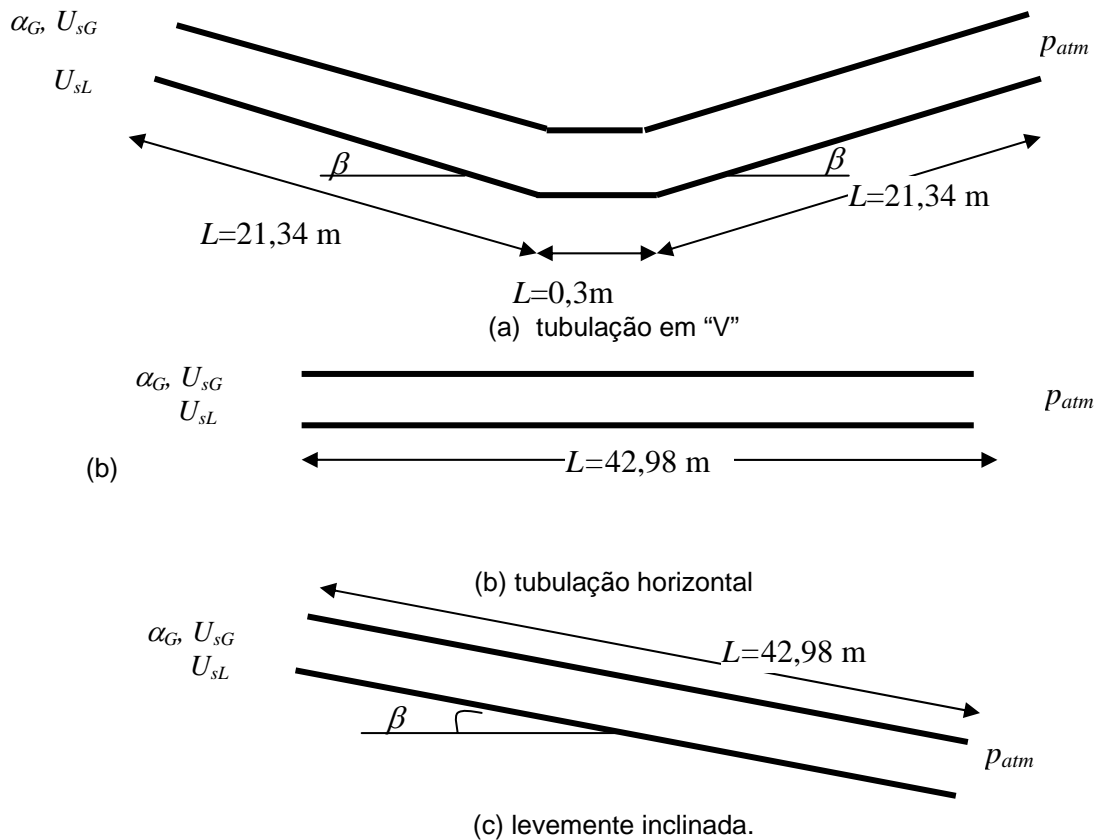


Figura 7.1 – Configurações utilizadas: (a) tubulação em "V"; (b) tubulação horizontal e (c) levemente inclinada.

### 7.1 Obtenção dos Regimes Estratificado e de Golfadas

Para verificar a capacidade de obtenção dos regimes de escoamento, a mesma geometria para a seção em "V" e propriedades dos fluidos utilizada no trabalho de Al Safran et al. (2005) foram utilizadas, conforme descrito acima. Visando identificar a influência da inclinação da tubulação nos padrões de escoamento, para as mesmas velocidades superficiais, investigou-se uma tubulação horizontal,  $\beta = 0^\circ$ , e outra descendente, com inclinação  $\beta = -1,93^\circ$  em relação à horizontal. O regime de escoamento foi obtido para dois pares de velocidades superficiais de líquido e gás iguais a  $U_{sL} = 1,22 \text{ m/s}$ ,  $U_{sG} = 1,3 \text{ m/s}$ ; e  $U_{sL} = 0,6 \text{ m/s}$ ,  $U_{sG} = 0,64 \text{ m/s}$ .

Os mapas apresentados nas Figs. 7.2 e 7.3 foram construídos para tubulações com inclinação  $\beta = 0^\circ$  e  $\beta = -1,93^\circ$  em relação à horizontal, respectivamente. O regime observado para cada condição de contorno testada é localizado na figura, na qual utilizou-se o símbolo quadrado para indicar que o regime de golfadas foi obtido, e

símbolo triangular para o regime estratificado.

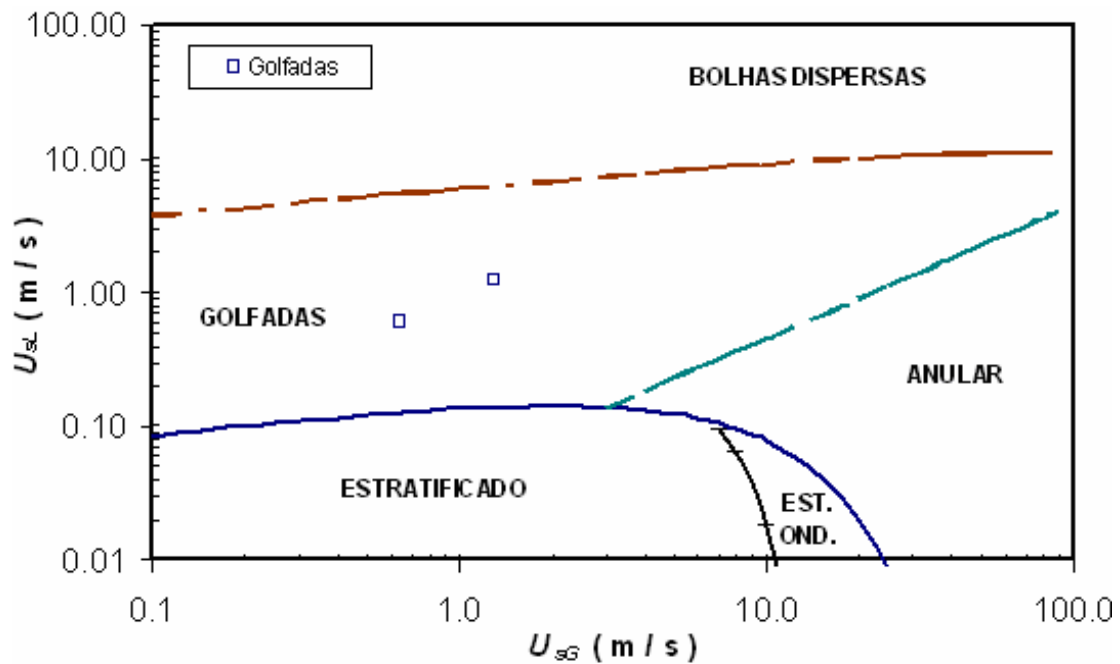


Figura 7.2 – Mapa de padrões de escoamento;  $D = 0,0508$  m, tubulação horizontal ( $\beta = 0^\circ$ ), e propriedades dos fluidos segundo Al Safran et al. (2005).

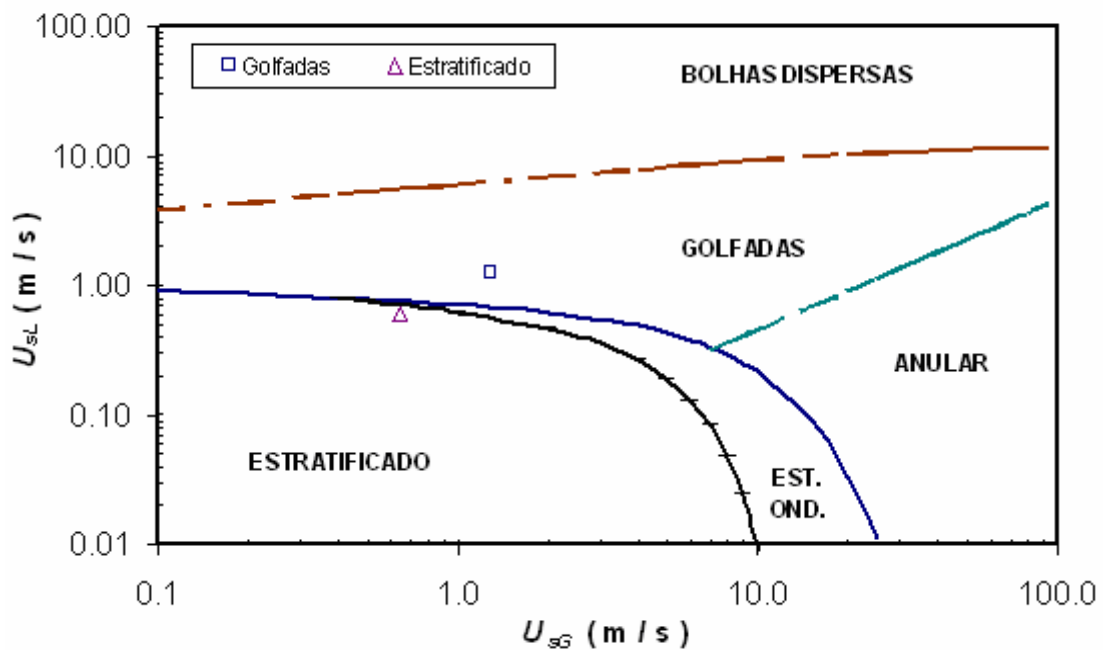


Figura 7.3 – Mapa de padrões de escoamento;  $D = 0,0508$  m, tubulação descendente ( $\beta = -1,93^\circ$ ), e propriedades dos fluidos segundo Al Safran et al. (2005).

Para o caso horizontal, Fig. 7.2, observa-se que o regime de golfadas foi observado nos dois casos analisados, confirmando a expectativa esperada através do

mapa. Para o caso da tubulação inclinada, Fig. 7.3, o mapa de padrões prevê um aumento da região de regime estratificado, englobando um dos casos que previamente situava-se na região de golfadas. Esta tendência também foi observada nas simulações.

## 7.2 Características das Golfadas

Através de observações experimentais, Al Safran et al. (2005) propuseram uma maneira de classificar qualitativamente a influência da seção em “V” nas características do regime de golfadas. A classificação apresentada no referido trabalho visa identificar regimes de escoamento no vale da tubulação como uma função das velocidades superficiais do líquido e do gás para diferentes ângulos de inclinação da tubulação. De acordo com os autores, o acúmulo de líquido no vale é devido à entrada de massa pela seção descendente e escoamento reverso pela seção ascendente. Portanto, o escoamento no vale é acoplado com as condições de escoamento da seção descendente à montante e ascendente à jusante. Porém, o comportamento qualitativo do escoamento (i.e., se as golfadas crescem ou não de tamanho, se ocorre ou não a formação de golfadas no vale da seção, ou se não há influência da irregularidade da tubulação) é acoplado somente ao comportamento do escoamento na seção descendente.

Diversas categorias são identificadas no trabalho de Al Safran et al. (2005), duas das quais são qualitativamente reproduzidas aqui. A primeira categoria escolhida (chamada “Categoria 1”) engloba os casos em que não se observam golfadas na seção descendente, mas estas podem ser formar no vale da seção devido à acumulação de líquido proveniente tanto da seção descendente quanto da ascendente. A segunda categoria (ou “Categoria 2”), por outro lado, incorpora as situações em que a frequência das golfadas na parte descendente é tão alta que não há tempo o suficiente para que haja a acumulação de líquido e formação de golfadas no vale da seção.

As velocidades superficiais de líquido e gás usadas nos casos escolhidos foram as seguintes:  $U_{sL} = 0,6$  m/s,  $U_{sG} = 0,64$  m/s, correspondentes à Categoria 1; e  $U_{sL} = 1,22$  m/s,  $U_{sG} = 1,3$  m/s;  $U_{sL}$ , correspondentes à Categoria 2. De modo a avaliar o efeito de pequenas inclinações nas características do regime de golfadas, três configurações foram testadas para cada caso: tubulação horizontal, tubulação descendente e seção em “V”. A seguir, os resultados encontram-se apresentados para cada categoria.

Infelizmente, somente foi possível realizar uma comparação qualitativa com os dados experimentais de Al Safran et al. (2005), pois os autores não puderam fornecer os

dados necessários para uma análise quantitativa devido ao sigilo comercial exigido para os mesmos. Adicionalmente, apesar da seção de teste em “V” utilizada na simulação ser exatamente como no referido trabalho, o comprimento total da tubulação na bancada experimental é de 420 m, pois foi utilizado um grande comprimento de tubulação a montante e outro a jusante da seção de testes. Uma vez que a simulação em uma tubulação de 420 m requer um excessivo esforço computacional e na falta de maiores detalhes experimentais devido ao sigilo comercial, optou-se por realizar somente uma comparação qualitativa.

### 7.2.1 Categoria 1

As Figuras 7.4 a 7.6 mostram a evolução dos perfis de *hold-up* com o tempo ao longo da tubulação, para as três geometrias utilizadas e velocidades superficiais iguais a  $U_{sL} = 0,6$  m/s e  $U_{sG} = 0,64$  m/s. O regime de golfadas é observado na tubulação horizontal, Fig. 7.4, mas não é observado para o caso em que a tubulação é descendente, Fig. 7.5, (conforme já apontado pelos mapas de padrões apresentados na seção anterior). Isto acontece devido ao efeito estabilizante exercido pela gravidade, a qual impede que pequenas perturbações cresçam na interface e originem as golfadas. Para a seção em “V”, ilustrada na Fig. 7.6, o regime de golfadas se desenvolve através da acumulação de líquido no vale. Para as velocidades superficiais utilizadas, este foi exatamente o comportamento observado experimentalmente por Al Safran et al. (2005).

A Tabela 7.1 apresenta os valores médios para a constante  $C_o$  (calculado a partir da eq. 6.1), frequência ( $\nu_s$ ), e comprimento adimensional ( $L_s / D$ ) das golfadas obtidos numericamente para a posição axial  $x = 37$  m. É interessante notar que o regime de golfadas, resultante da acumulação de líquido no vale da seção em “V”, possui uma frequência superior àquela observada para o caso horizontal, o que ocorre pelo fato de as golfadas possuírem um comprimento médio menor neste caso (já que as velocidades não variam significativamente). Esta tendência também foi observada por Al Safran et al. (2005). Ainda, o valor da constante  $C_o$  para as golfadas iniciadas no vale da seção em “V” situa-se próximo de 1,2 ; resultado este também obtido experimentalmente.

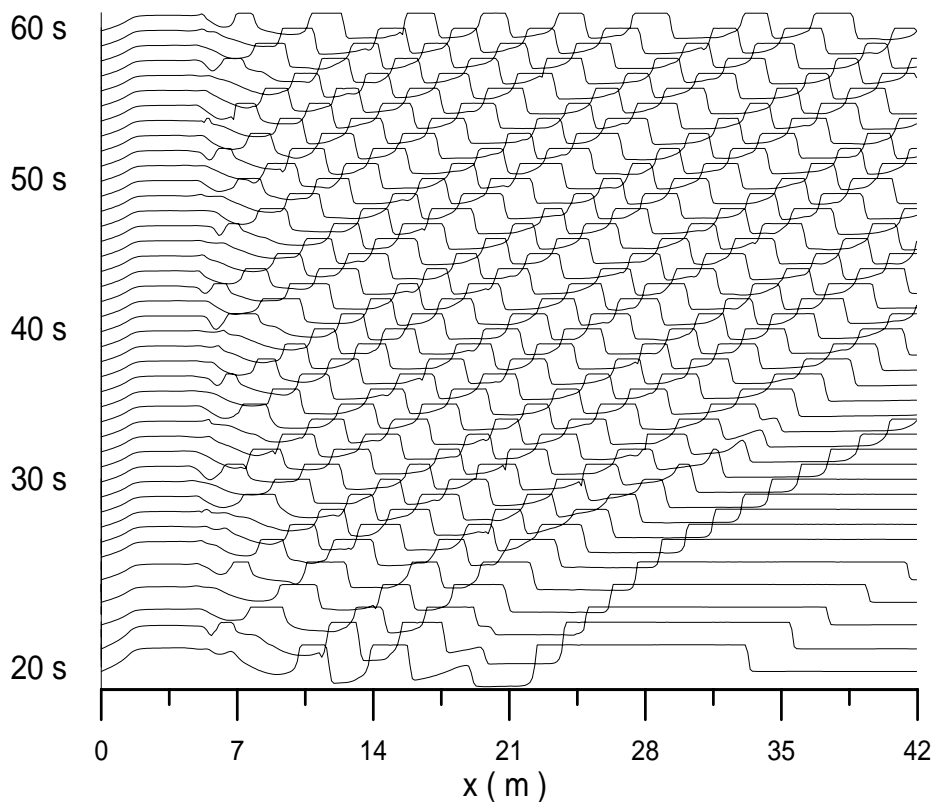


Figura 7.4 - Evolução dos perfis de *hold-up* com o tempo:  $U_{SL} = 0,6$  m/s e  $U_{SG} = 0,64$  m/s; tubulação horizontal

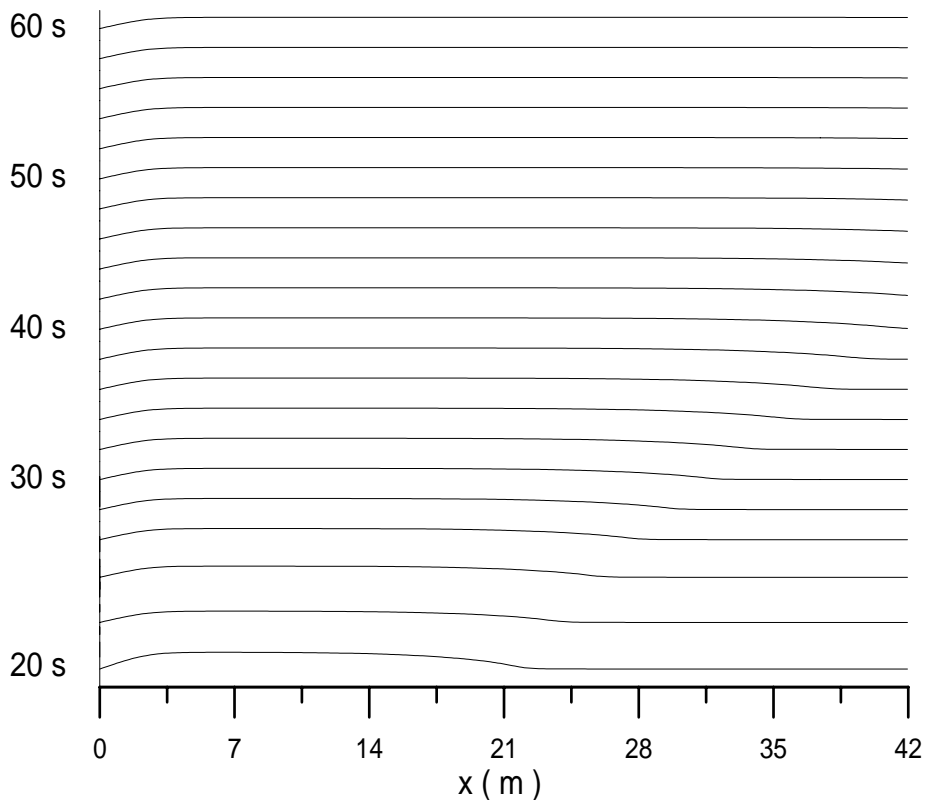


Figura 7.5 - Evolução dos perfis de *hold-up* com o tempo:  $U_{SL} = 0,6$  m/s e  $U_{SG} = 0,64$  m/s; tubulação descendente

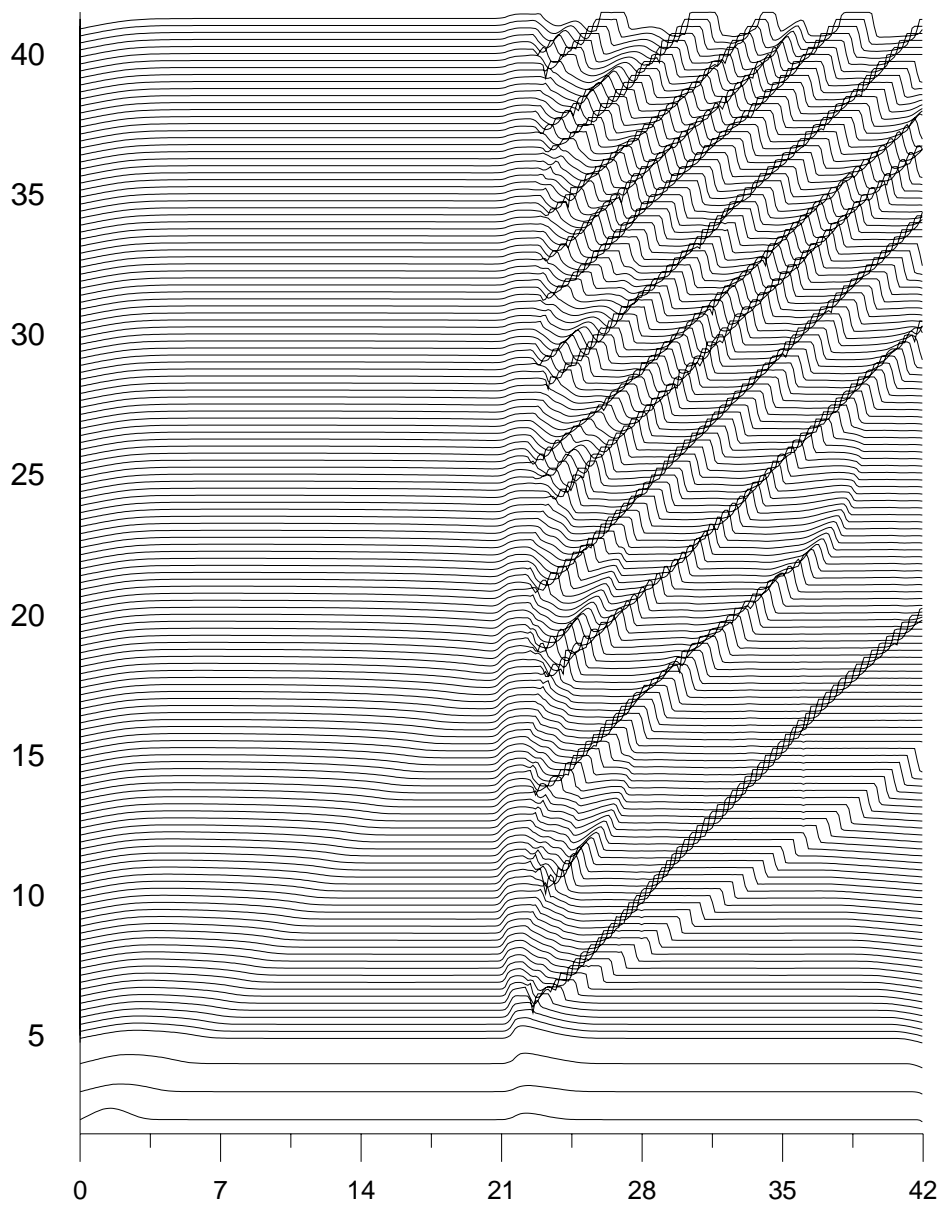


Figura 7.6 - Evolução dos perfis de *hold-up* com o tempo:  $U_{SL} = 0,6$  m/s e  $U_{SG} = 0,64$  m/s; seção em “V”.

Tabela 7.1 – Variação dos parâmetros médios das golfadas com a geometria da tubulação, em  $x = 37$ m, para  $U_{SL} = 0,6$  m/s e  $U_{SG} = 0,64$  m/s

<b>Geometria</b>	$C_o$	$\nu_s$ (1 / s)	$L_s / D$
Horizontal	1,25	0,33	42,6
Descendente	-	-	-
“V”	1,23	0,38	29,6

### 7.2.2 Categoria 2

As Figuras 7.7 a 7.9 apresentam a evolução dos perfis de *hold-up* com o tempo, ao longo da tubulação, para as três geometrias utilizadas e velocidades superficiais iguais a  $U_{sL} = 1,22$  m/s e  $U_{sG} = 1,3$  m/s. Pode-se observar que, ao contrário da Categoria 1, as golfadas ocorrem em todos os casos analisados: tanto para o caso horizontal, Fig. 7.7, quanto para o caso descendente ilustrado na Fig. 7.8 e para a seção em “V”, Fig. 7.9. Nota-se que para esta categoria, o mecanismo de formação das golfadas é igual em todas as geometrias, ocorrendo a aproximadamente a 7 m da entrada para todos os casos (na realidade, a gravidade parece retardar um pouco a formação das golfadas, uma vez que estas se formam, para o caso horizontal, um pouco mais perto da entrada). Adicionalmente, nota-se que, devido às altas frequências envolvidas, não há tempo suficiente para que haja acumulação de líquido no vale da seção, portanto no caso da seção em “V”, não surgem golfadas adicionais resultantes deste fenômeno, estando de acordo com as observações experimentais de Al Safran et al. (2005).

A Tabela 7.2 apresenta os valores médios para a constante  $C_o$  (calculado a partir da eq. 6.1), frequência ( $\nu_s$ ), e comprimento adimensional ( $L_s / D$ ) das golfadas obtidos numericamente para a posição axial  $x = 37$  m. Analisando a Tabela 7.2, observa-se que assim como para a Categoria 1, não foram observadas diferenças significativas entre os valores obtidos para a constante  $C_o$  nas diferentes geometrias. Entretanto, uma discrepância um pouco maior (a maior foi para o caso horizontal, igual a 17%) em relação ao valor 1,2 foi encontrada. Entre os casos horizontal e descendente, observou-se uma diminuição do comprimento médio das golfadas em 5%, e a frequência permaneceu praticamente constante. Já para a seção em “V”, observou-se um aumento considerável do comprimento médio das golfadas (de 58% em relação ao caso descendente e 53% em relação ao caso horizontal), o qual é acompanhado por uma diminuição da frequência (de aproximadamente 14% em relação aos outros dois casos). O aumento do comprimento médio das golfadas, para este caso, pode ser devido ao acúmulo de líquido no vale, que apesar de não induzir novas golfadas, adiciona líquido às mesmas, fazendo-as crescerem de tamanho. Outro fator que possivelmente contribui para este efeito é o fato de que a velocidade do filme de líquido na parte ascendente é menor. Assim, maior deve ser a velocidade relativa entre as golfadas e o filme de líquido à frente delas, e portanto maior a quantidade de líquido incorporada.



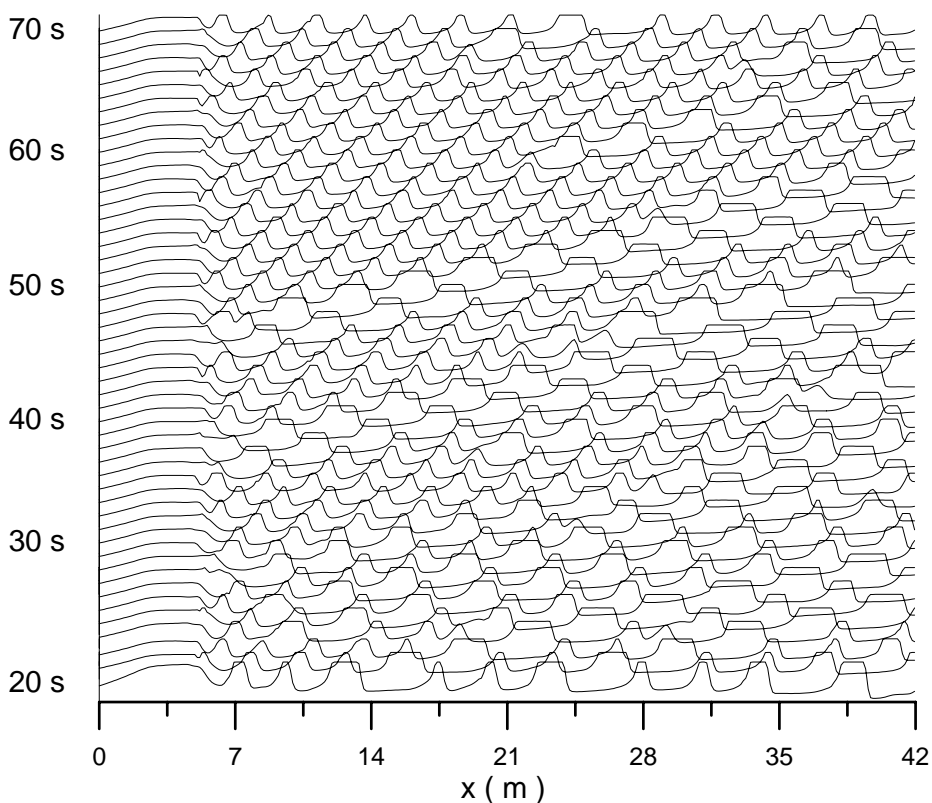


Figura 7.7 - Evolução dos perfis de *hold-up* com o tempo:  $U_{SL} = 1,22$  m/s e  $U_{SG} = 1,3$  m/s; tubulação horizontal

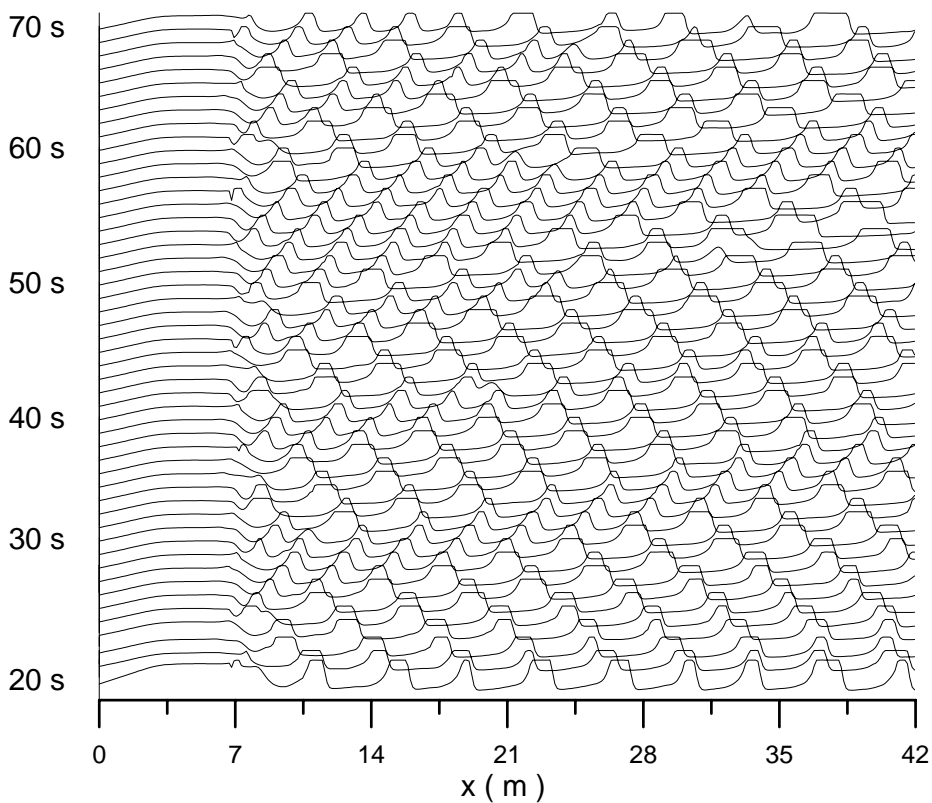


Figura 7.8 - Evolução dos perfis de *hold-up* com o tempo:  $U_{SL} = 1,22$  m/s e  $U_{SG} = 1,3$  m/s; tubulação descendente.

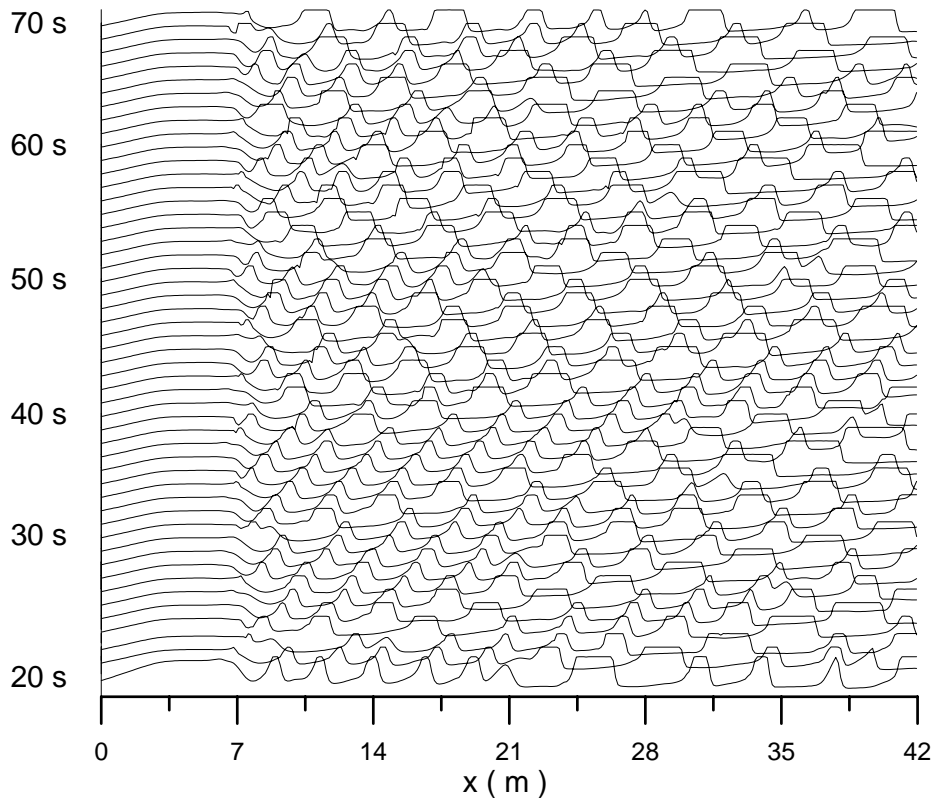


Figura 7.9 - Evolução dos perfis de *hold-up* com o tempo:  $U_{SL} = 1,22$  m/s e  $U_{SG} = 1,3$  m/s; seção em “V”.

Tabela 7.2 – Variação dos parâmetros médios das golfadas com a geometria da tubulação, para  $U_{SL} = 1,22$  m/s e  $U_{SG} = 1,3$  m/s.

<b>Geometria</b>	$C_o$	$\nu_s$ (1 / s)	$L_s / D$
Horizontal	1,40	0,95	13,9
Descendente	1,39	0,94	13,5
“V”	1,37	0,83	21,3

A Fig. 7.10 ilustra a variação do comprimento médio das golfadas ao longo da tubulação para as três geometrias analisadas. É interessante notar que não houve uma variação significativa neste parâmetro quando os casos horizontal e descendente são analisados. As altas velocidades superficiais envolvidas parecem minimizar o efeito da gravidade. Ainda assim, observa-se uma pequena diferença nos perfis, sendo que valores um pouco maiores são observados para a geometria descendente até a coordenada  $x = 600 D$ , e um pouco maiores no caso horizontal a partir desta posição. Uma maior degeneração de golfadas ocorre no caso descendente, formando ondas que são incorporadas por outras golfadas, as quais crescem de tamanho. Por outro lado, o

processo de crescimento das golfadas no caso horizontal parece sobrepor este fator para longas distâncias axiais.

Para a seção em “V”, maiores comprimentos foram observados ao longo de toda a tubulação; sendo que as maiores diferenças em relação às outras geometrias ocorrem na parte ascendente da seção (a partir de  $425 D$ , aproximadamente), onde também nota-se um aumento significativo no comprimento das golfadas. Isto claramente mostra uma assimetria da influência da gravidade no comprimento das golfadas. Segundo Al Safran (2005), apesar de a seção em “V” ser simétrica, a influência da gravidade não necessariamente o é, podendo ser mais significativa tanto na parte descendente quanto na parte ascendente, a depender do caso analisado.

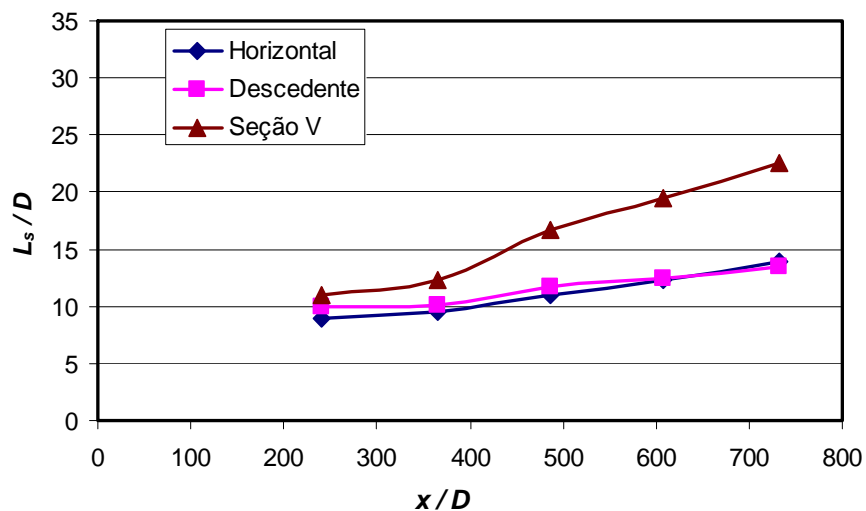


Figura 7.10 – Variação do comprimento médio das golfadas ao longo da tubulação:  $U_{sL} = 1,22$  m/s e  $U_{sG} = 1,3$  m/s; tubulação horizontal, descendente e seção em “V”.