

## 7 Conclusões

Ao longo deste trabalho, o escoamento intermitente foi analisado sobre diversos aspectos, iniciando-se por uma intensa avaliação de parâmetros estatísticos característicos importantes através da utilização do sistema de interruptores de feixe. Em sequência, a técnica de sombra foi utilizada em conjunto com uma inovadora metodologia de processamento de imagens, com o intuito de avaliar as velocidades e os formatos da frente e da traseira da bolha alongada, desde regimes mais simples com pouca quantidade de bolhas dispersas, até regimes mais complexos, onde a intensa quantidade de bolhas dispersas é um fator complicador e limitador para os procedimentos de processamento de imagens.

A avaliação da distribuição do comprimento dos pistões de líquido confirmou que a distribuição *lognormal* é adequada na descrição do comportamento aleatório deste parâmetro, em acordo com as afirmações de *Nydal et al. (1992)* e *Ujang et al. (2006)*. Quanto ao espalhamento dos dados ao redor do valor médio, um coeficiente de variação em torno de 37 % foi encontrado, estando em total acordo com o valor obtido por *Nydal et al. (1992)*. A possibilidade da existência de pistões de líquido com comprimento médio elevado sob determinadas velocidades superficiais de líquido e de gás, reportada no trabalho de *Kadri et al. (2009)*, foi investigada. Em regimes localizados na região de pistões longos, como recomendado pelos autores, o comprimento médio observado neste presente trabalho foi inferior a  $40D$ , enquanto *Kadri et al. (2009)* observaram comprimentos médios superiores a este patamar. Nos demais pontos investigados, o comprimento médio abaixo de  $40D$  está em comum acordo com as observações daqueles autores. Para velocidades de mistura mais elevadas, um comprimento médio próximo a  $20D$  foi observado, tal como o valor observado por *Nydal et al. (1992)* em uma seção de testes curta. As diferenças entre as velocidades da frente e da traseira do pistão, sugerem que as divergências entre as observações deste presente trabalho e as de *Kadri et al. (2009)* são possivelmente devido a enorme diferença de comprimento para a seção de testes utilizada; *Kadri et al.* utilizaram uma seção de testes com  $137\text{ m}$  de comprimento, enquanto que no presente, utilizou-se uma seção curta com

aproximadamente 20 m de comprimento. A conclusão destes resultados é que para corretas observações de pistões longos ( $L_s > 40D$ ), pequenas diferenças entre as velocidades da frente e da traseira do pistão são importantes, pois influenciam na evolução do comprimento dos mesmos ao longo da seção de testes. Por outro lado, para pistões menores ( $L_s < 40D$ ), seções curtas como as utilizadas por *Nydal et al. (1992)* e por este presente trabalho demonstram-se plenamente adequadas.

Quanto a frequência de passagem dos pistões, novamente a distribuição *lognormal* demonstrou-se adequada. A dependência da frequência média de passagem dos pistões com a variação da velocidade superficial de líquido foi reportada por *Woods et al. (2006)* e *Wang et al. (2007)* e confirmada pelo presente trabalho. Já a fraca dependência com a velocidade superficial de gás observada neste trabalho, está em comum acordo com as observações de *Wang et al. (2007)*. A correlação de *Fossa et al. (2003)* para o ajuste da frequência adimensional, demonstrou-se adequada quando comparada aos resultados obtidos. Além disso, a boa concordância dos dados da frequência adimensional com os dados experimentais obtidos por *Wang et al. (2007)* em uma seção longa de 133 m de comprimento, sugerem que a frequência pode ser corretamente observada também em uma seção de testes curta ( $L = 20 m$ ).

O comportamento do comprimento médio da bolha alongada com a variação das velocidades superficiais também foi analisado, estando a observação de que este parâmetro é dependente, predominantemente, da variação da velocidade superficial de gás em comum acordo com as observações de *Wang et al. (2007)*. Um critério de no mínimo duas células unitárias ocuparem a seção de testes simultaneamente foi utilizada para considerar a medida do comprimento médio da bolha alongada válida. Foi possível a comparação de dois valores do comprimento médio da bolha alongada com o modelo desenvolvido por *Fagundes Netto et al. (1999)*, apresentando bons resultados. No entanto, por se tratar de uma seção de testes curta, os resultados obtidos necessitam de uma validação mais extensa.

A velocidade média da frente e da traseira da bolha alongada foi investigada através do processamento de imagens em conjunto com o sistema de interruptores de feixe. Uma comparação dos dados obtidos pelas duas técnicas, permitiu identificar que o sistema de interruptores necessita de aprimoramentos quando o regime em estudo apresenta extensa quantidade de bolhas dispersas, sobretudo, nas regiões vizinhas ao nariz da bolha alongada. Por este motivo, somente os dados obtidos através do

processamento de imagens foram utilizados para quaisquer interpretações. Os resultados obtidos, foram bem previstos pelas correlações de *Bendiksen (1984)* e *Woods e Hanratty (1996)*, sugerindo que a velocidade de deslizamento não pode ser desprezada nas faixas de velocidades superficiais estudadas. Uma ligeira mudança na correlação de *Woods e Hanratty (1996)*, motivada pelo abaixamento do nariz da bolha alongada, possibilitou uma previsão mais precisa, diminuindo o erro médio absoluto de 6,7 % para 3,3 %. O abaixamento do nariz da bolha alongada com o aumento do número de *Froude*, fato extensamente citado na literatura, foi confirmado *quantitativamente*, onde uma dependência linear foi obtida. Da extensa revisão bibliográfica realizada, foi a primeira vez que esse fato foi confirmado quantitativamente.

O comportamento do formato do nariz da bolha alongada também foi investigado, onde mudanças apreciáveis foram observadas com a variação do número de *Froude*. As comparações do formato do nariz da bolha alongada com a solução invíscida de *Benjamin (1968)* confirmaram um desvio significativo com o aumento da velocidade superficial de gás. O desvio é menor para velocidades superficiais de gás baixas, sugerindo que as tensões viscosas e os efeitos de tensão superficial não podem ser desprezados nas faixas estudadas por este presente trabalho.

O formato da traseira da bolha alongada também pôde ser analisado por uma metodologia análoga àquela usada para definir o formato da frente. Isso permitiu a comparação de *dois* formatos da traseira da bolha alongada com o modelo de *Fagundes Netto et al. (1999)*, onde uma boa concordância foi obtida tanto para a espessura de filme quanto para o ângulo. Um comportamento dependente da espessura de filme de líquido e do ângulo do salto hidráulico foi observado. Os modelos de espessura de filme de líquido não prevêm essa dependência, de modo que os resultados necessitam de uma investigação mais extensa antes de quaisquer interpretações. Infelizmente a literatura apresenta uma escassez de dados, principalmente na região onde o escoamento transita do padrão "bolha alongada" para o padrão "golfada", caso analisado por este presente trabalho.

Como sugestões para trabalhos futuros, possivelmente como uma sequência para este trabalho, seria interessante o desenvolvimento de uma técnica óptica estereoscópica capaz de analisar tridimensionalmente a região adjacente ao nariz da bolha alongada. Um estudo mais detalhado dessa região pode ajudar a esclarecer o mecanismo do movimento da bolha de acordo com o número de *Froude* e sua influência sobre o

escoamento intermitente. Técnicas de velocimetria por imagens de partículas também seriam interessantes, já que especula-se na literatura que o abaizamento do nariz e a mudança mais pronunciada da velocidade de translação da bolha alongada com a velocidade de mistura, estão relacionadas ao comportamento do campo de velocidades existente nessa região. Por fim, o formato da bolha alongada sob as mesmas condições que neste presente trabalho, poderia ser analisado numa seção de testes construída em acrílico. Este fato contribuiria para elucidar o fato de que as tensões superficiais entre o *FEP* e o escoamento não influenciam significativamente na dinâmica da bolha, e, portanto, não contribuem para o desvio dos resultados quando comparados à solução invíscida de *Benjamim (1968)*.