

## 4 Análise de Casos

No presente trabalho determinou-se numericamente a taxa de deposição de parafina em escoamento bifásico, com a metodologia descrita nos capítulos anteriores, para dois tipos de escoamento e comparou-se com dados experimentais. O primeiro tipo corresponde a configurações de escoamento analisadas por Matzain (1999) com condições controladas em laboratório. Os resultados desta análise são apresentados neste capítulo. O segundo tipo envolve dados reais de um poço produtor da Petrobras e é apresentado no próximo capítulo. Para fins de comparação, em ambos os casos, o problema também foi resolvido com o programa Olga 5.3 (Scandpower).

Matzain (1999) investigou a influência do padrão de escoamento e inclinação da tubulação na taxa de deposição de um hidrocarboneto escoando ao longo de tubulações horizontais, inclinadas e verticais. Visando comparar com os dados de Matzain, procurou-se representar exatamente as mesmas condições que as utilizadas nos experimentos. Considerou-se os padrões de fluxo intermitente, bolha e estratificado. Apresenta-se a influência da fração de gás, da presença da água e da porosidade da parafina na espessura da deposição.

As propriedades do fluido foram caracterizadas a partir de sua composição utilizando o programa PVTSIM 18 (Calsep) e as correlações apresentadas no Capítulo 2. Ainda como apresentado no Capítulo 2, utilizou-se para cada padrão de escoamento, as correlações apropriadas de perda de carga e de transferência de calor.

A seguir, os detalhes geométricos da configuração utilizada por Matzain (1999) são descritos, seguido da especificação das propriedades do hidrocarboneto. Finalmente, os resultados das simulações são apresentados.

### 4.1 Geometria e Condições de Contorno

A seção de teste desenvolvida por Matzain (1999) para medir a deposição de parafina é do tipo casco-tubo, onde o óleo parafínico escoar pela parte interna do

tubo. Para resfriar o óleo e dar origem à formação do depósito de parafina, a tubulação é resfriada utilizando glicol escoando na região anular entre o casco e a tubo interno. A tubulação interna é do tipo 304 steel pipe Sch 40 com comprimento  $L = 7,0$  m, diâmetro  $D = 2$  in (0,0508 m), espessura da tubulação  $e = 0,003$  m, rugosidade  $\varepsilon = 0,02$  mm, condutividade térmica do tubo interno  $k_s = 17,3$  W/(mK). O casco externo é do tipo CPVC pipe (plástico térmico) Sch 80, diâmetro  $D_{ex} = 4$  in (0,1016 m).

Para todos os casos a pressão de entrada foi de  $P_{int} = 24,13$  bar e temperatura de entrada do fluido  $T_{in} = 40,56$  °C. Foi considerada a TIAC para início da cristalização de 51 °C. O óleo utilizado possuía API = 35. A densidade relativa do gás é igual a 0,70 e densidade relativa da água é igual a 1,0.

Para o fluido externo de refrigeração foi utilizado glicol com vazão de 318 m<sup>3</sup>/dia, massa específica  $\rho_{gl} = 1113,2$  kg/m<sup>3</sup>, viscosidade  $\mu_{gl} = 0,0216$  Pa s, condutividade térmica  $k_{gl} = 0,596$  W/(m k), calor específico à pressão constante  $Cp_{gl} = 2756,0$  J/(kg K) com temperatura de entrada igual a  $T_{ext} = 15,56$  °C.

## 4.2 Caracterização do Fluido

A definição das propriedades termofísicas do fluido depende fortemente da composição. A composição do fluido utilizado por Matzain (1999) foi caracterizada pelo programa PVTSIM 18 (Calsep), sendo agrupados em pseudo-componentes os hidrocarbonetos acima do C10. A Tabela 4.1 contém a composição do fluido utilizado para a determinação das propriedades pelo modelo termodinâmico.

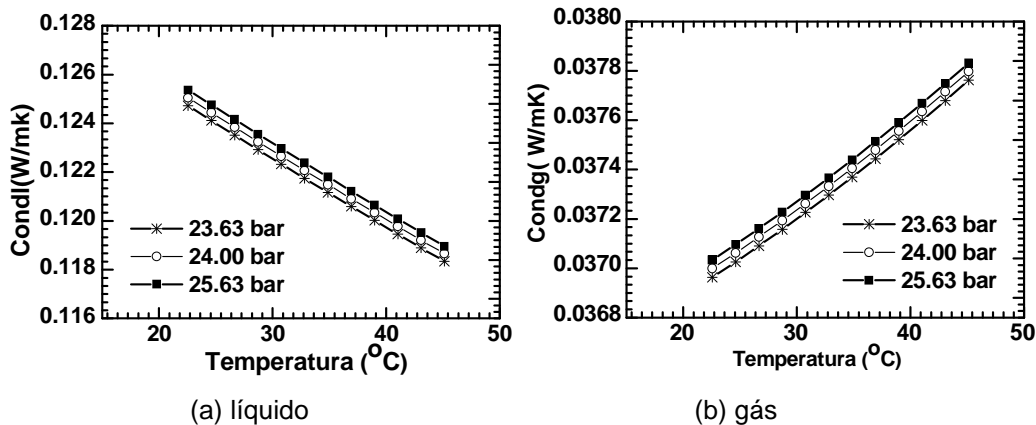
Conforme descrito no Capítulo 2, as massas específicas dos fluidos foram definidas a partir de correlações do modelo *black oil*. As correlações de viscosidade absoluta e coeficiente de difusão molecular da parafina também encontram-se no Capítulo 2.

Para especificar a condutividade térmica e a capacidade térmica do óleo do óleo, do gás e da água utilizou-se uma tabela gerada pelo programa PVTSIM 18 (Calsep). A tabela foi gerada para os valores de pressão e temperatura próximos ao do experimento e foi utilizada a composição do fluido apresentado na Tabela 4.1.

Podemos observar nos gráficos da Figura 4.1 que a condutividade térmica do líquido e do gás apresentam pequena dependência com a pressão e a temperatura para o intervalo analisado.

**Tabela 4.1:** Composição do fluido

Componente	Fração Molar	Peso Molecular	Fração de parafina
N2	0,36	28,01	
CO2	0,10	44,01	
C1	13,34	16,04	
C2	0,66	30,07	
C3	0,27	44,10	
iC4	0,16	58,12	
nC4	0,35	58,12	
iC5	0,54	72,15	
nC5	0,44	72,15	
C6	0,95	86,17	
C7	3,36	96,00	
C8	5,77	107,00	
C9	5,93	121,00	
C10-C12	15,45	146,67	
C13-C14	9,78	182,25	
C15-C17	12,19	220,02	0,14000
C18-C19	6,28	256,60	0,00733
C20-C22	7,08	288,87	0,00400
C23-C25	4,9	330,55	0,00329
C26-C30	5,14	383,99	0,00185
C31-C41	4,34	487,96	0,00059
C42-C80	2,60	718,67	0,00018
Total	100,00	200,66	0,06587



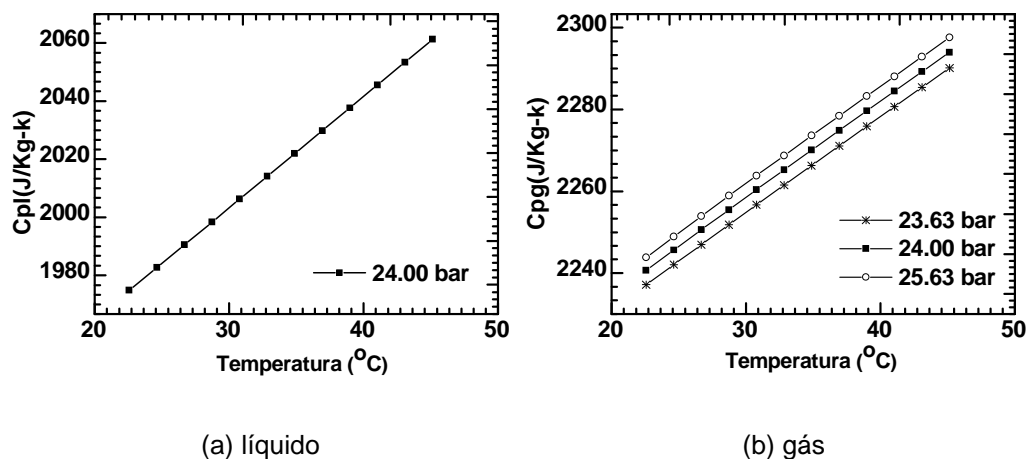
**Figura 4.1:** Condutividade térmica do líquido e do gás

As Equações 4.1 e 4.2 representam o ajuste dos pontos para determinar a condutividade térmica do líquido e gás em função da temperatura, correspondente a faixa empregada no experimento, para a pressão média constante de 24,00 bar.

$$k_l = 0,1314 - 3 \times 10^{-4} T \quad (4.1)$$

$$k_g = 0,0362 + 4 \times 10^{-5} T \quad (4.2)$$

A Figura 4.2 apresenta a variação do calor específico à pressão constante do líquido e gás no intervalo de interesse. Observam-se variações inferiores a 1% com relação à temperatura e variações menores ainda com relação à pressão. Então, foram considerados valores constantes para o calor específico, os quais foram fixados como sendo iguais a  $C_{pl} = 2283,3 \text{ J/(kg K)}$  para o líquido e  $C_{pg} = 2044,61 \text{ J/(kg K)}$  para o gás.



**Figura 4.2:** Calor específico à pressão constante do líquido e do gás

A Figura 4.3 apresenta a curva de cristalização da parafina obtida através do programa PVTSIM 18 (Calsep) com a composição do fluido indicada da Tabela 4.1. Observa-se razoável concordância com a curva obtida por Bruno *et al.* (2008). A curva de solubilização foi obtida através da diferença de concentração de saturação da solução óleo/parafina dada em gramas de soluto por grama de solução em função da temperatura.

Para utilizar na simulação numérica foi ajustada a seguinte equação para representar os pontos da curva de solubilização apresentada na Figura 4.3, para a faixa de interesse do experimento.

$$w = 3 \times 10^{-7} T^3 - 3 \times 10^{-5} T^2 + 1,4 \times 10^{-3} T + 0,0324 \quad (4.3)$$

A partir da Eq. (4.3), pode-se determinar a derivada da solubilidade com a temperatura como

$$\partial w/\partial T = 9 \times 10^{-7} T^2 - 6 \times 10^{-5} T + 1,4 \times 10^{-3} \quad (4.4)$$

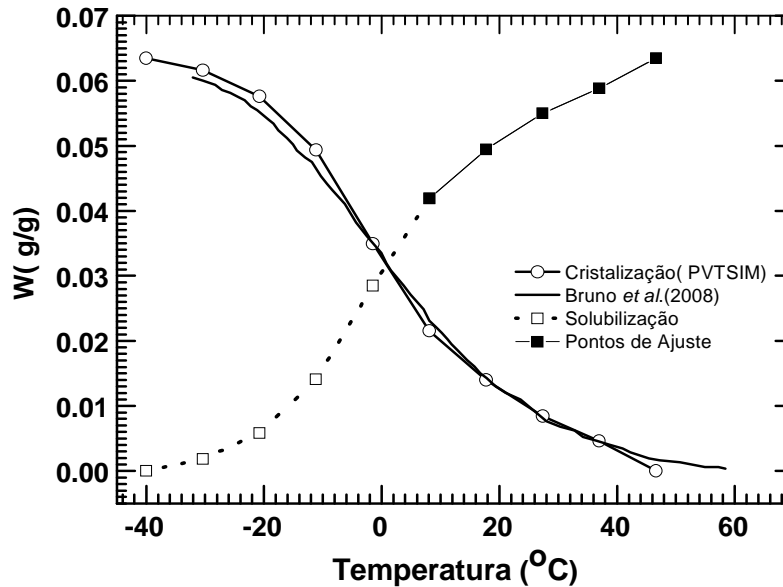


Figura 4.3: Curva de solubilização de parafina.

### 4.3 Estudo de Casos

Para avaliar o desempenho da presente metodologia para prever o depósito de parafina em escoamento bifásico, foram selecionados sete casos dos analisados por Matzain (1999), os quais encontram-se listados na Tabela 4.2. Selecionou-se casos com diferentes padrões de escoamento: intermitente (golfada), bolha e estratificado. Naturalmente que o escoamento estratificado foi obtido com a tubulação na horizontal, enquanto que o escoamento no padrão de bolhas foi obtido com a tubulação na vertical. Diferentes inclinações da tubulação foram utilizadas com a análise do padrão intermitente. Os diferentes padrões de escoamentos são obtidos a partir de diferentes velocidades superficiais, as quais encontram-se ilustradas na Tabela 4.2.

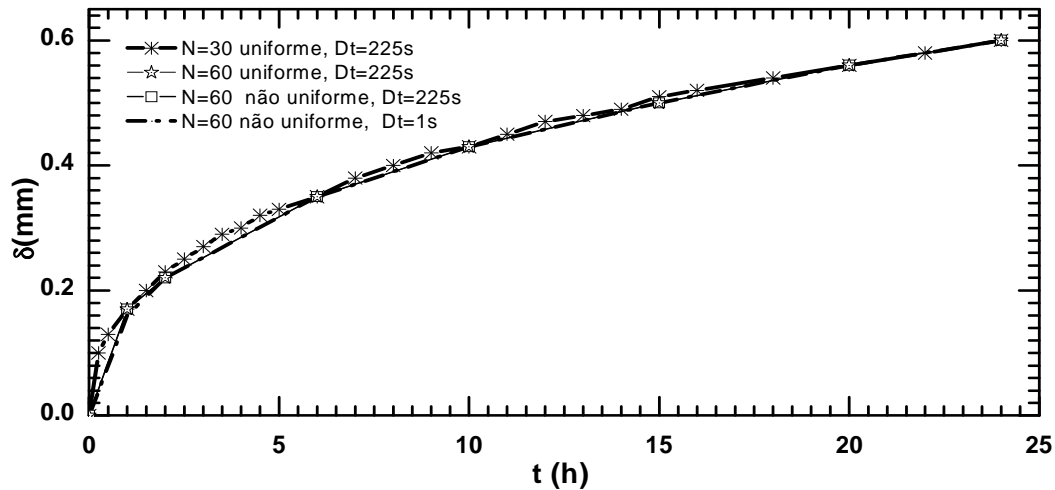
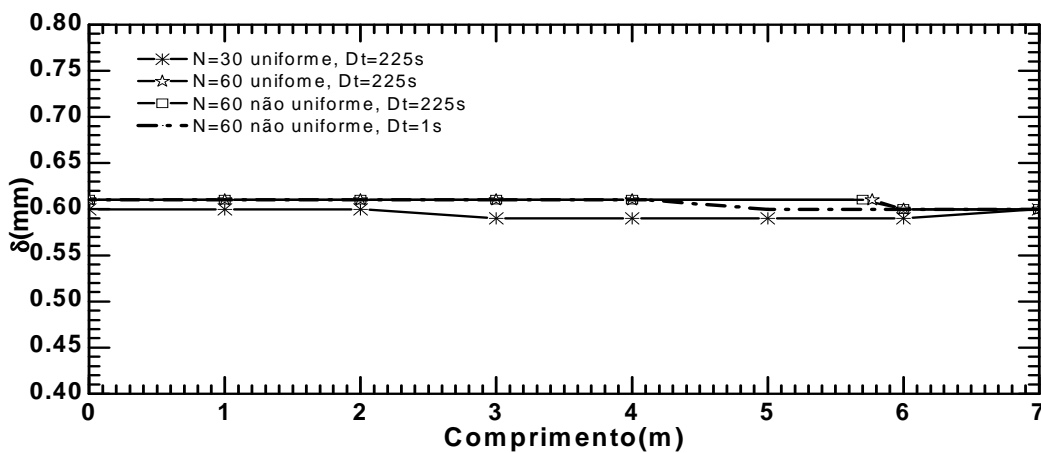
Comparação dos resultados obtidos com a presente metodologia e os dados apresentados por Matzain (1999) somente é realizada através da variação temporal da espessura do depósito na saída da tubulação, e da variação espacial do depósito após um período de 24 horas após o início do resfriamento do escoamento, pois são os únicos dados disponíveis no trabalho de Matzain (1999).

**Tabela 4.2:** Casos Estudados

Caso	$V_{sl}$ (m/s)	$V_{sg}$ (m/s)	Padrão	Ângulo Horizontal (graus)
1	1,219	0,305	Intermitente	0
2	1,219	1,524	Intermitente	0
3	1,219	4,572	Intermitente	0
4	0,305	1,219	Intermitente	2
5	0,609	0,914	Intermitente	90
6	1,219	0,152	Bolha	90
7	0,061	0,305	Estratificado	0

A distribuição de deposição de parafina foi analisada para todos os casos comparando-se com os valores experimentais obtidos por três métodos térmicos utilizados por Matzain (1999). O primeiro método denominado Método Térmico HT-1, considera que a condutividade térmica da parafina é igual à condutividade térmica do óleo. O Método Térmico HT-2 considera a condutividade térmica da parafina igual ao dobro da condutividade térmica do óleo. O Método LD-LD é baseado em medições de temperatura, pressão, vazão de óleo e vazão de gás, as quais são utilizadas para determinar a espessura de depósito pelo modelo numérico proposto por Matzain (1999).

Todas as simulações foram realizadas utilizando uma malha com 60 pontos distribuídos não uniformemente na direção axial e um passo de tempo 225 s. A malha foi definida a partir de um teste de malha. Um resultado típico correspondente ao Caso 2 encontra-se ilustrado na Fig. 4.4. A Figura 4.4a apresenta a variação temporal do depósito na saída do canal, enquanto que a Fig. 4.4b apresenta a distribuição espacial após um período de 24 horas do início do resfriamento. Observa-se que todas as soluções são praticamente coincidentes. Na saída da tubulação, uma pequena discrepância é encontrada nos primeiros instantes de tempo, onde uma diferença inferior a 4% é encontrada, enquanto que para os instantes de tempo maiores, as soluções são coincidentes. A maior discrepância observada para a distribuição espacial da espessura (Fig. 4.4b) corresponde a malha mais grosseira, a discrepância é inferior a 3%. As soluções com a mesma malha e passo de tempo de 1s e 225 s resultaram em soluções praticamente idênticas.

(a) Evolução temporal da deposição em  $x = 7$  metros(b) Distribuição espacial da espessura do depósito em  $t = 24$  horas.**Figura 4.4:** Teste de malha e de passo de tempo

A mesma malha foi utilizada na simulação com o programa OLGA 5.3 (Scandpower). No entanto, o passo de tempo é definido internamente pelo programa e um passo de tempo bem menor foi empregado (0,06 s).

Inicialmente realizou-se um teste de sensibilidade das constantes empíricas  $C_1$  e  $C_2$  (Eqs. 2.76 e 2.77) propostas por Matzain (1999) para a avaliação da taxa de deposição. A seguir, investigou-se diferentes padrões de escoamento, assim como inclinações da tubulação. Estes resultados são apresentados nas seções seguintes.

#### 4.3.1

##### **Análise de Sensibilidade das Constantes Empíricas $C_1$ e $C_2$**

Conforme descrito no Capítulo 2, Matzain (1999) propôs corrigir o fluxo de massa de parafina para considerar aumentos na taxa de depósito devido a outros

mecanismos além da difusão molecular, com a inclusão de uma constante empírica  $C_1 = 15$ , multiplicando o coeficiente de difusão. Propôs ainda, incluir uma função empírica dependente do número de Reynolds de forma a reduzir a quantidade de depósito para levar em conta efeitos do cisalhamento na taxa de deposição. A função (Eq.2.74) é definida utilizando duas constantes empíricas ajustadas como sendo  $C_2 = 0,055$  e  $C_3 = 1,4$ .

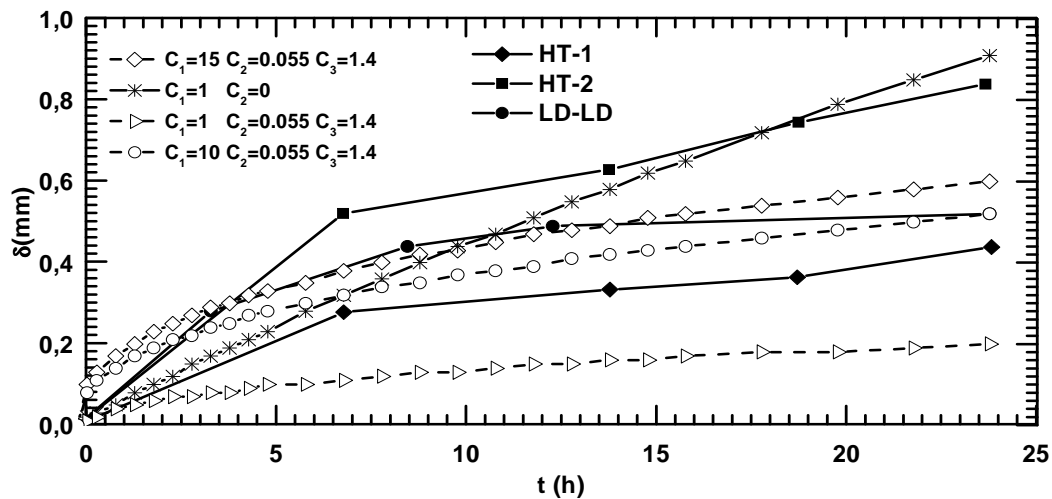
Como primeira etapa da presente análise investigou-se a influência das constantes empíricas na taxa de deposição. Inicialmente, o problema foi resolvido considerando as constantes propostas por Matzain (1999). A seguir, desprezou-se qualquer tipo de correção, isto é, o coeficiente de difusão não foi aumentado ( $C_1=1$ ) e a correção devido ao cisalhamento foi eliminada ao utilizar  $C_2 = 0$ . A seguir, variou-se o valor da constante  $C_1$ . Para realizar esta análise foi escolhido o Caso 2, que corresponde ao regime de escoamento no padrão intermitente, com velocidade superficial do gás intermediária entre os casos 1 e 3, em tubulação horizontal.

A Figura 4.5 apresenta a variação temporal da espessura do depósito na saída da tubulação ( $x=7$  m) em função do tempo. Os valores obtidos por Matzain são apresentados juntamente com os resultados obtidos com a presente metodologia. Os três métodos utilizados por Matzain apresentam a mesma tendência, isto é, um crescimento acentuado da espessura do depósito nas primeiras 6,5 horas, e depois um crescimento mais suave tendendo assintoticamente para um valor constante de regime permanente. Nota-se, no entanto, que após as 24 horas do experimento, o regime permanente ainda não havia sido obtido. Observa-se ainda uma diferença razoável entre os valores da espessura do depósito obtidos pelos três métodos por Matzain, com diferenças que chegam a 50%. O método HT-2 apresenta maiores valores de espessura devido ao valor mais elevado utilizado para a condutividade térmica da parafina. Menores valores de espessura foram obtidos com o método HT-1. Os valores experimentais obtidos com o método LD-LD apresentam distribuição intermediária entre HT-1 e HT-2, provavelmente por incluir ajustes dos valores, uma vez que foram obtidos com uma combinação de valores medidos e modelagem.

O resultado obtido com a presente metodologia, utilizando as constantes recomendadas por Matzain, apresenta ótima concordância com os dados LD-LD. No início do processo, Matzain não apresenta muitos pontos e a espessura do depósito



parece ser ligeiramente superior. Entre 5 e 15 horas a espessura do depósito obtida no presente trabalho é muito próxima os dados da metodologia LD-LD, e após 15 a presente metodologia super-estimou ligeiramente a espessura do depósito.



**Figura 4.5:** Evolução temporal da deposição em  $x = 7$  metros. Teste de sensibilidade das constantes de Matzain

Analisando a figura, observa-se que a constante empírica  $C_2$  é fundamental na modelagem, pois ao desprezar a redução da taxa de depósito em função do número de Reynolds ( $C_2 = 0$ ), o crescimento do depósito previsto varia quase que linearmente com o tempo, em vez de tender assintoticamente para uma espessura de regime permanente. O valor da espessura do depósito cresce exageradamente, mesmo sem incluir o valor recomendado para a constante  $C_1$ . Note que o resultado apresentado corresponde a  $C_1 = 1$ . De forma a identificar a influência de  $C_2$  do fluxo de massa, o valor de  $C_1$  foi mantido igual a 1 e o valor  $C_2=0,055$  como recomendado foi utilizado. Obteve-se um comportamento assintótico da espessura de depósito com o tempo, mas a mesma foi muito subestimada, indicando que o mecanismo de difusão não é o único mecanismo relevante com já ressaltado por Azevedo e Leiroz (2003). Uma última simulação foi realizada utilizando  $C_1=10$ , mantendo-se os outros parâmetros como recomendado por Matzain. Observa-se que a espessura prevista após 24 horas coincide com os valores obtidos pelo método LD-LD, no entanto nos outros instantes de tempo os valores ficaram abaixo dos experimentais.

Para manter a coerência nas análises comparativas entre os valores simulados no presente trabalho e os experimentais obtidos por Matzain foram utilizados na simulação numérica de todos os casos, os mesmos valores para as

constantes  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  que os recomendados por Matzain (1999). As mesmas constantes empíricas de Matzain foram utilizadas nas simulações realizadas com o programa OLGA 5.3.(Scandpower).

### 4.3.2 Padrão Intermitente Horizontal

Os Casos 1, 2 e 3 correspondem ao padrão de escoamento intermitente em uma tubulação horizontal. A velocidade superficial do líquido foi mantida constante e variou-se a velocidade superficial do gás. A Figura 4.6 apresenta a distribuição temporal do depósito de parafina na saída da seção de teste ( $x=7m$ ) para os Casos 1, 2 e 3. Os resultados obtidos com a presente metodologia são comparados com os valores medidos por Matzain (1999) e os resultados obtidos com o programa OLGA 5.3 (Scandpower).

Observa-se que os resultados obtidos para os três casos se situaram dentro da faixa dos valores medidos pelos métodos HT-1 e HT-2 e concordaram razoavelmente com os valores medidos pelo método LD-LD. Os resultados também apresentaram concordância razoável com o programa OLGA 5.3 (Scandpower). As mesmas constantes  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  foram utilizadas nos três casos, mostrando que o ajuste é satisfatório.

Analisando a Fig. 4.6, observa-se para os três casos excelente concordância entre a previsão do OLGA e da presente metodologia para os instantes iniciais., sendo que a medida que o tempo passa, a presente metodologia prevê uma espessura de depósito ligeiramente maior do que a prevista pelo Olga.

Entre 5 e 10 horas, os valores medidos por Matzain com o método LD-LD são ligeiramente superiores e depois deste intervalo de tempo passam a ser ligeiramente inferiores. Para o Caso 3 com maior velocidade superficial de gás, os métodos HT-1 e HT-2 apresentaram uma oscilação irrealista da espessura do depósito com o avanço do tempo.

A Figura 4.7 apresenta a distribuição espacial da espessura do depósito de parafina para os Casos 1,2 e 3 após 24 horas de simulação. Observa-se que após 24 horas, praticamente todo o duto apresenta a mesma espessura de depósito. Matzain (1999) não conseguiu medir a espessura do depósito bem próximo à entrada, e os valores medidos experimentalmente em todo o duto apresentaram pequena oscilação.

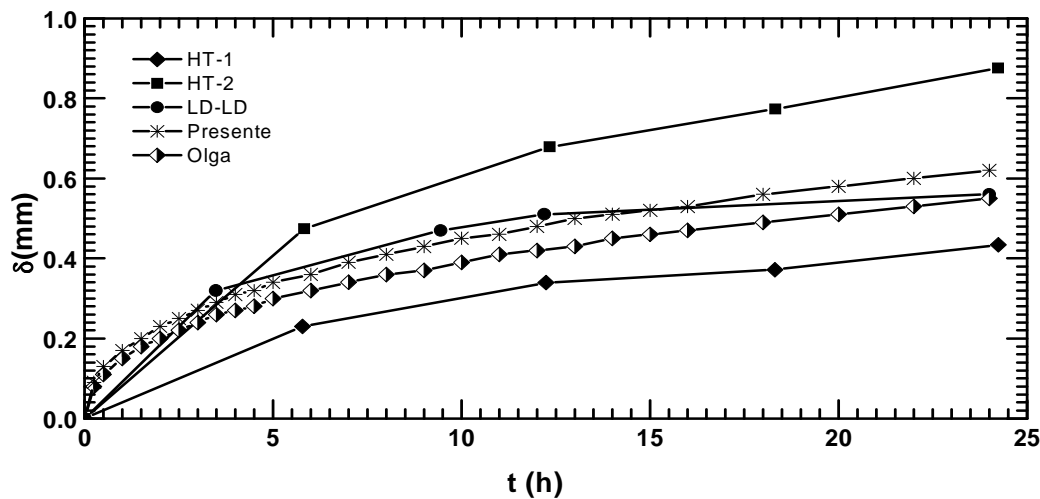
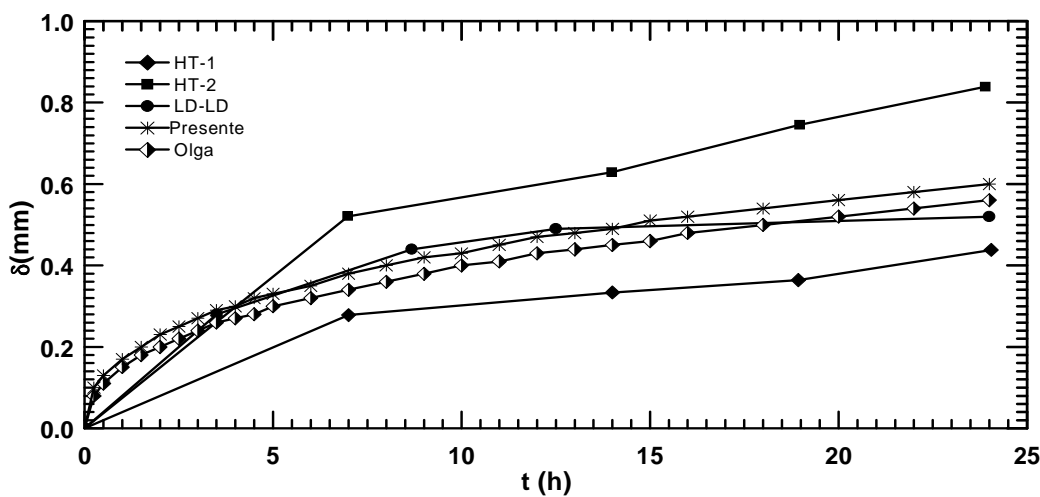
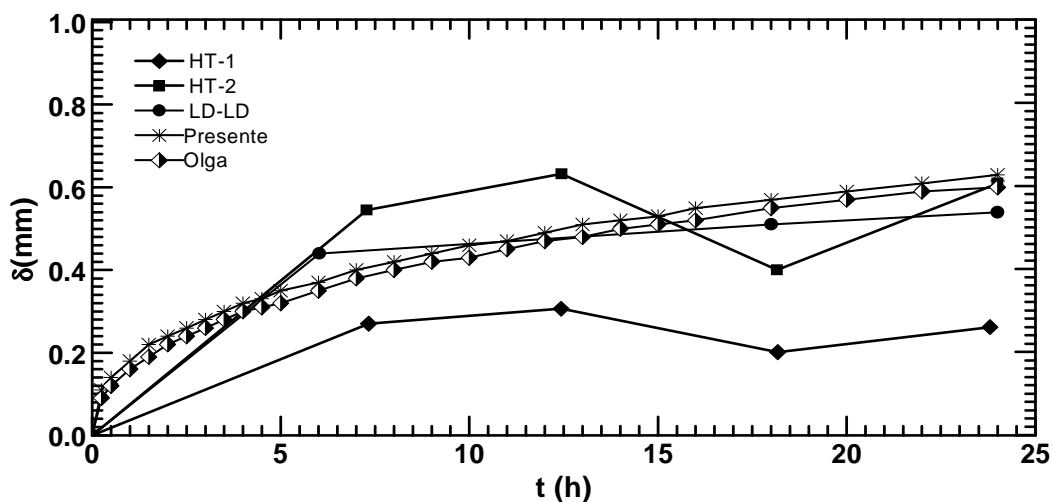
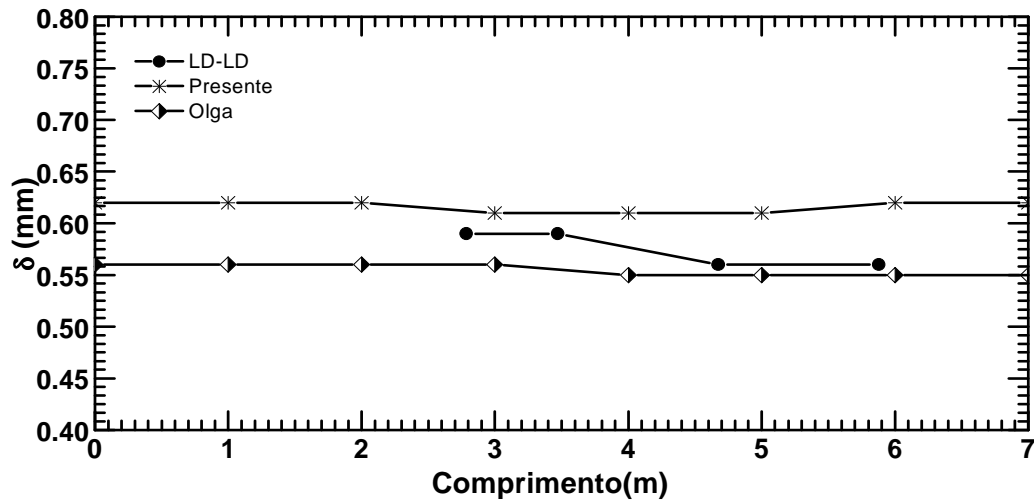
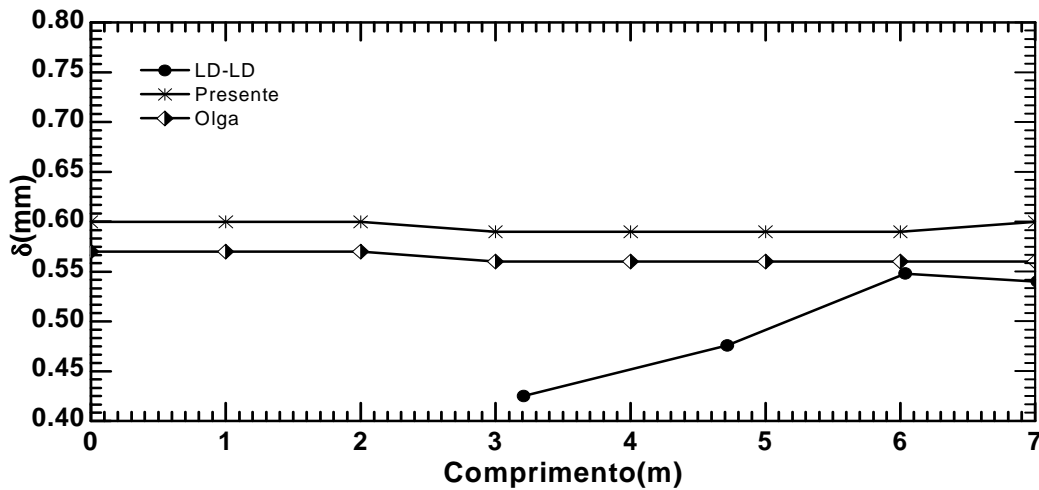
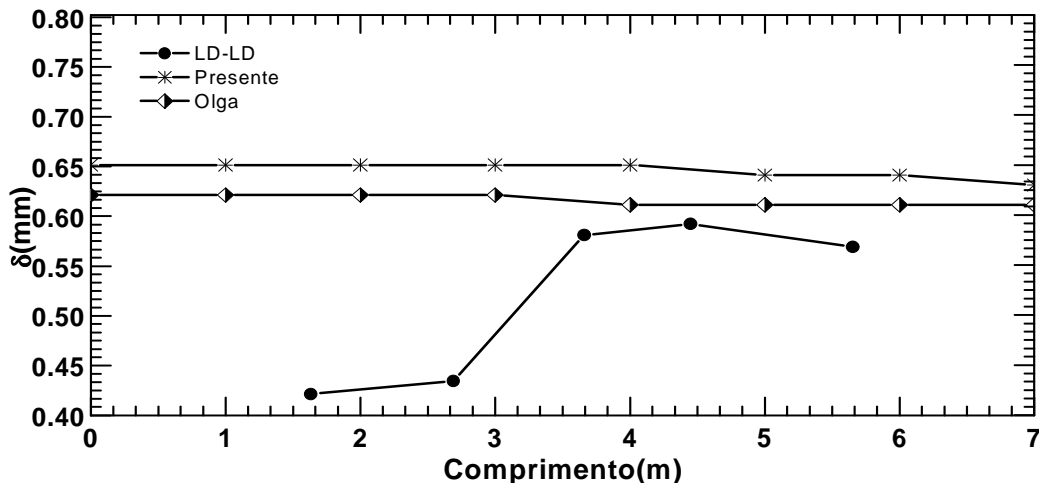
(a) Caso 1:  $V_{sl} = 1, 219$  m/s,  $V_{sg} = 0, 305$  m/s(b) Caso 2:  $V_{sl} = 1, 219$  m/s,  $V_{sg} = 1, 524$  m/s(c) Caso 3:  $V_{sl} = 1, 219$  m/s,  $V_{sg} = 4, 572$  m/s

Figura 4.6: Evolução temporal da deposição em  $x = 7$  metros. Padrão intermitente horizontal. Casos 1, 2 e 3

(a) Caso 1:  $V_{sl} = 1,219$  m/s,  $V_{sg} = 0,305$  m/s(b) Caso 2:  $V_{sl} = 1,219$  m/s,  $V_{sg} = 1,524$  m/s(c) Caso 3:  $V_{sl} = 1,219$  m/s,  $V_{sg} = 4,572$  m/sFigura 4.7: Distribuição espacial da espessura do depósito em  $t = 24$  horas.

Padrão intermitente horizontal. Casos 1, 2 e 3

Os Casos 1 e 3 apresentam boa concordância entre os valores informados por Matzain com o método LD-LD e as previsões do OLGA 5.3 (Scandpower), assim como com os resultados do presente trabalho. Já o Caso 2 de Matzain apresenta uma variação maior da espessura entre 3 e 6 m, enquanto as simulações numéricas apresentam espessura quase que constante. Como já observado na Figura 4.6, a presente metodologia prevê uma espessura de depósito ligeiramente superior ao previsto pelo programa OLGA5.3 (Scandpower).

A Tabela 4.3 apresenta a espessura do depósito obtida com a presente metodologia no final do duto após 24 horas para os três casos e compara com os resultados obtidos com o programa OLGA 5.3 (Scandpower) e os dados de Matzain (1999). Observa-se que ambos os modelos numéricos apresentaram aproximadamente a mesma ordem de grandeza de erros, alternando qual caso apresenta melhor concordância com os valores medidos por Matzain.

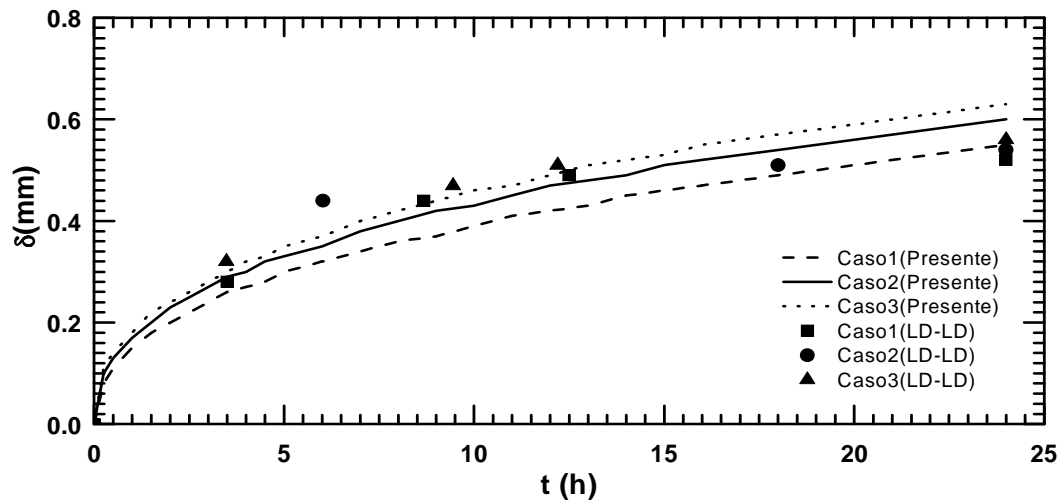
Analisando os dados da Fig. 4.7 e Tabela 4.3 pode-se afirmar que a variação da velocidade do gás não induz um aumento da espessura do depósito. Os valores obtidos por Matzain e os resultados da presente metodologia oscilam mantendo a tendência, enquanto que os dados do OLGA mostram um pequeno aumento da espessura com o aumento da velocidade do gás.

**Tabela 4.3:** Espessura do depósito no final do duto após 24 horas

Caso	Coordenada	Matzain LD-LD	Presente	Erro %	OLGA	Erro %
1	5,9-6,0	0,56	0,61	8,9	0,55	-1,8
2	7,0	0,54	0,60	11	0,56	3,7
3	6,9-7,0	0,57	0,63	10,5	0,61	7,0

Para melhor visualizar a influência do aumento da velocidade superficial do gás (aumento da fração de gás), a Fig. 4.8 apresenta uma comparação da evolução temporal da espessura do depósito na saída da tubulação ( $x=7\text{m}$ ) para os três casos. Os resultados da presente metodologia são comparados com os valores obtidos com o método LD-LD por Matzain. Para os três casos apresentados, a velocidade superficial do líquido foi mantida constante ( $V_{sl} = 1,219\text{ m/s}$ ), enquanto que a velocidade superficial do gás variou de  $V_{sg} = 0,305\text{ m/s}$  a  $V_{sg} = 4,572\text{ m/s}$ . Analisando a Fig. 4.8 juntamente com a Fig. 4.7 e Tabela 4.3 pode-se afirmar que a velocidade de gás apresenta pouca influência no processo de deposição, pois a

espessura é aproximadamente constante. Este resultado é esperado, pois como apresentado no Capítulo 2, o coeficiente de troca de calor interno para o regime intermitente é governado pelo líquido (Eqs. 2.49 e 2.50). Conseqüentemente, a perda de calor para o meio externo é aproximadamente igual, assim como a temperatura do óleo, o que resulta no mesmo fluxo difusivo de massa para a parede (Eq. 2.74).



**Figura 4.8:** Influência da fração de gás na distribuição temporal da espessura do depósito em  $x=7m$ . Padrão intermitente horizontal. Casos 1, 2 e 3.

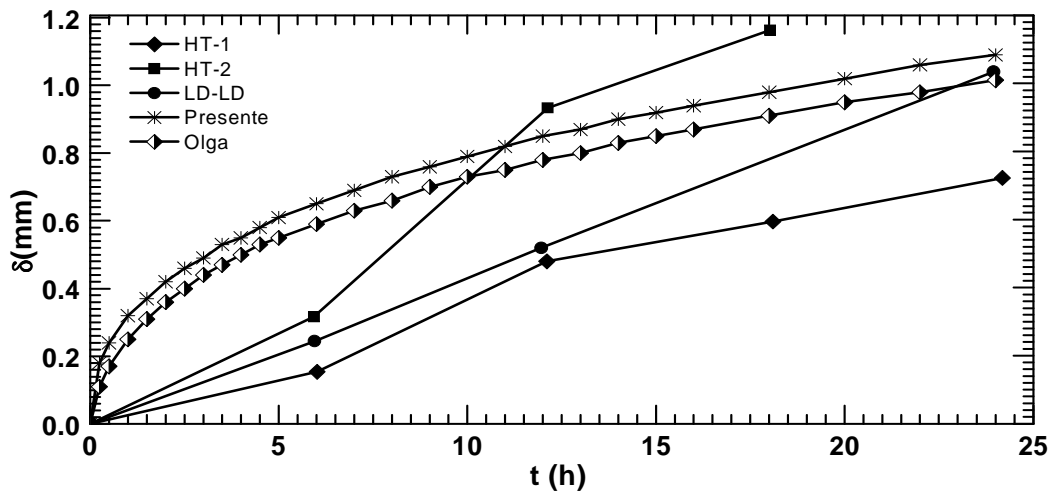
### 4.3.3 Padrão Intermitente Inclinado e Vertical

A influência da inclinação da tubulação no padrão de escoamento intermitente pode ser avaliada, analisando os Casos 4 e 5, que correspondem a levemente inclinado de  $2^\circ$  e vertical, respectivamente.

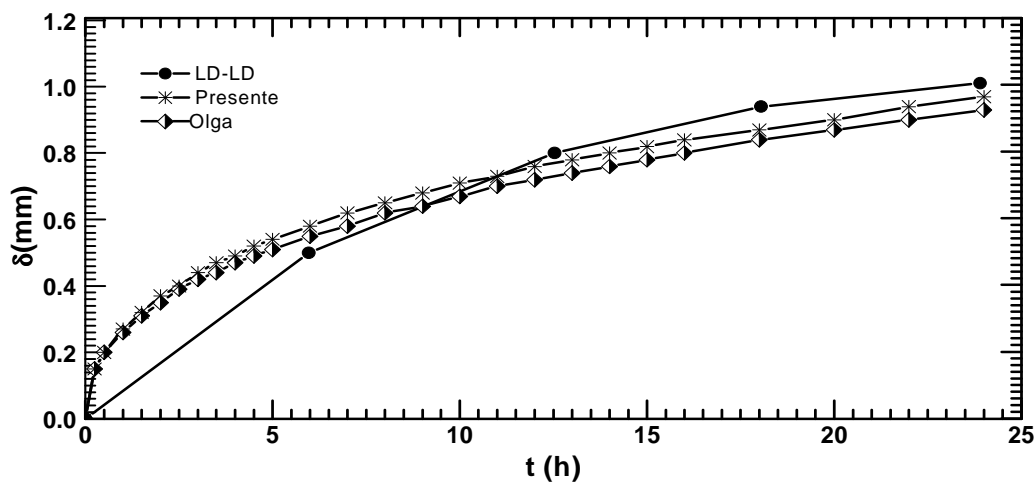
A distribuição temporal para a deposição de parafina na saída da tubulação (coordenada  $x=7m$ ) é apresentada na Fig. 4.9 para os Casos 4 e 5. Somente para o Caso 4 foram incluídos os valores referentes as medidas utilizando as técnicas HT-1 e HT-2. Como nos casos com a tubulação na horizontal, os valores obtidos com a metodologia LD-LD, encontram-se entre os valores medidos com as duas outras técnicas, que apresentam grande diferença de resultados.

Para o caso da tubulação com pequena inclinação, observa-se na Fig. 4.9a, que ambas as metodologias numéricas apresentaram uma espessura de depósito maior do que as medidas para os instantes de tempo iniciais, até aproximadamente 12 horas após o início do processo. Porém para os instantes finais, ambos os modelos

apresentaram boa concordância com relação aos dados de Matzain com o método LD-LD. Novamente, as previsões com o presente modelo foram ligeiramente superiores aos valores obtidos com o programa OLGA 5.3 (Scandpower).



(a) Caso 4:  $V_{sl} = 0,305$  m/s,  $V_{sg} = 1,219$  m/s. Inclinação  $\theta = 2^\circ$



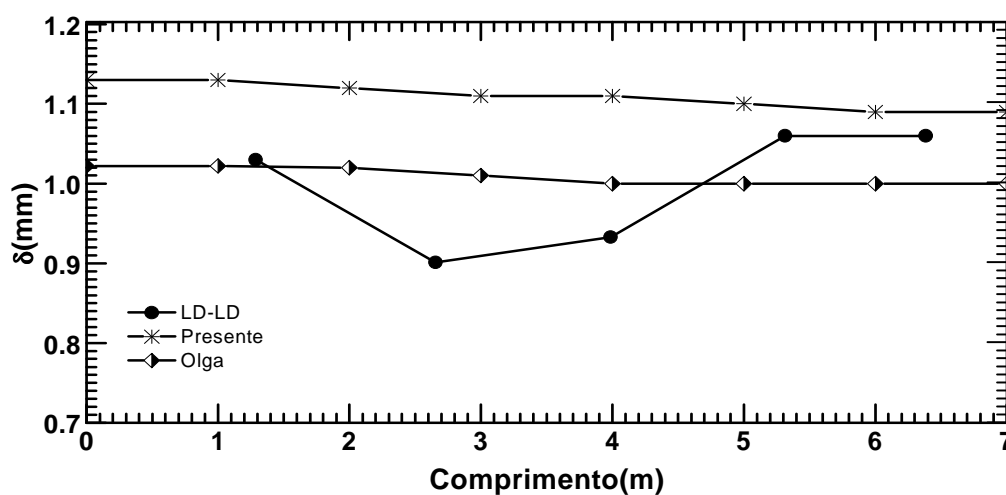
(b) Caso 5:  $V_{sl} = 0,609$  m/s,  $V_{sg} = 0,914$  m/s. Vertical  $\theta = 90^\circ$

**Figura 4.9:** Evolução temporal da deposição em  $x = 7$  metros. Padrão intermitente inclinado e vertical. Casos 4 e 5.

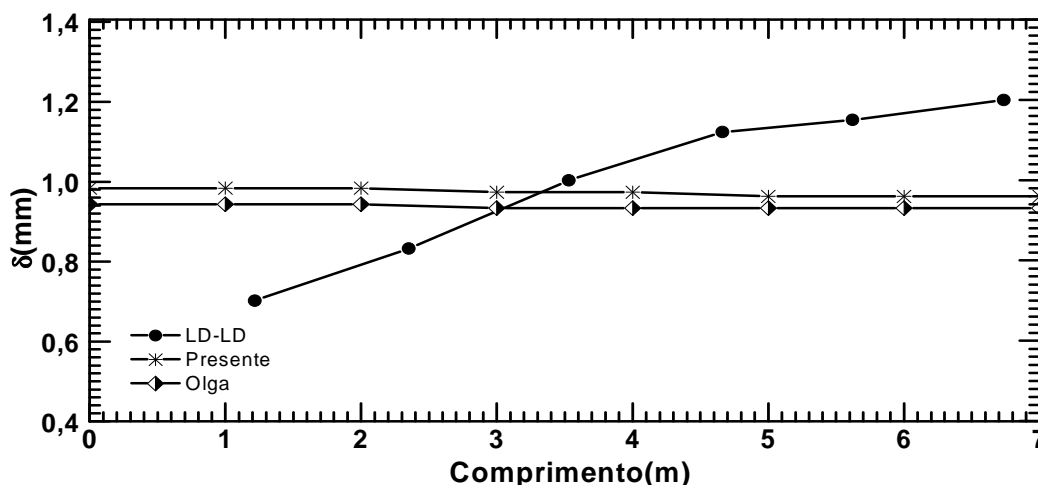
No caso da tubulação vertical, observa-se na Fig. 4.8b, que os valores medidos também são inferiores aos obtidos pelas previsões numéricas nos instantes iniciais, mas obteve-se uma concordância melhor entre os resultados, após 5 horas do início do processo. Neste caso, observa-se que os valores obtidos com o programa OLGA 5.3 (Scandpower) foram um pouco superiores aos obtidos com a presente metodologia.

De um modo geral, a inclinação da tubulação não alterou de forma significativa a forma com que o depósito cresce a medida que o tempo passa. Observa-se, no entanto que houve um aumento significativo na espessura do depósito, passando de aproximadamente 0,6 mm para 1 mm, após 24 horas de resfriamento.

A Figura 4.10 ilustra a distribuição espacial do depósito para os Casos 4 e 5. Para ambos os casos, tanto o OLGA como a presente metodologia apresentaram uma espessura de depósito aproximadamente constante ao longo da tubulação, após um período de 24 horas de resfriamento.



(a) Caso 4:  $V_{sl} = 0,305$  m/s,  $V_{sg} = 1,219$  m/s. Inclinação  $\theta = 2^\circ$



(b) Caso 5:  $V_{sl} = 0,609$  m/s,  $V_{sg} = 0,914$  m/s. Vertical  $\theta = 90^\circ$

**Figura 4.10:** Distribuição espacial da espessura do depósito em  $t = 24$  horas.

Padrão intermitente inclinado e vertical. Casos 4 e 5.



No Caso 4 (Inclinação  $\theta=2^\circ$ ) ilustrado na Fig. 4.10a, pode-se observar que uma pequena redução de depósito ao longo foi prevista com ambos os algoritmos numéricos, provavelmente devido a uma pequena redução na perda de calor para o ambiente devido à inclinação da tubulação. Os dados experimentais de Matzain obtidos com o método LD-LD apresentam uma redução e posterior aumento de depósito. Esta oscilação na espessura do depósito não parece realista, sendo uma mera oscilação dentro da incerteza da medida.

Os dados medidos de espessura de depósito ao longo do duto após 24 horas de resfriamento, por Matzain (1999) com o método LD-LD, para o escoamento no padrão intermitente ao longo de uma tubulação vertical (Caso 5), ilustrado na Fig. 4.10b, apresentam uma variação significativa. Esta variação não foi capturada pelos dois simuladores, os quais também apresentaram uma pequena redução na espessura do depósito ao longo da tubulação.

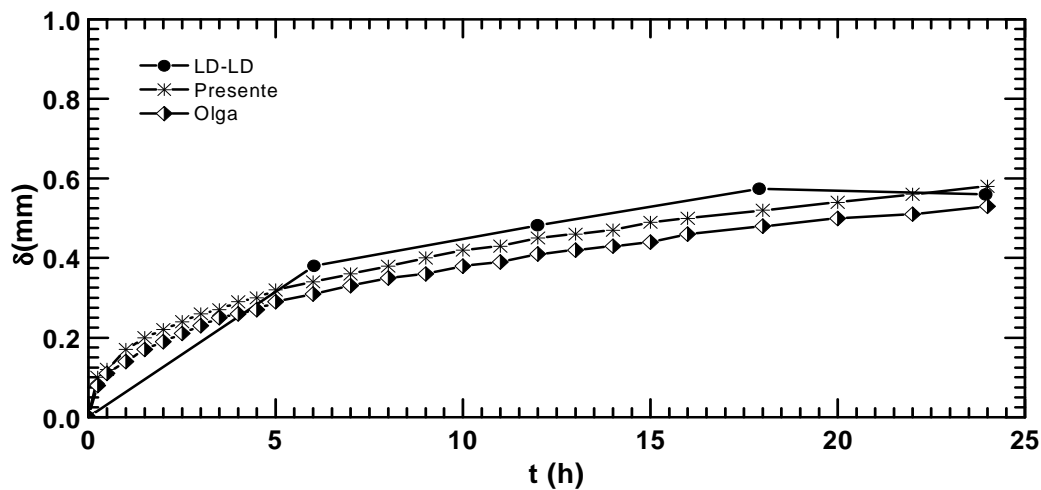
Analisando as figuras correspondentes à todos os caso intermitentes, observa-se que houve um aumento significativo na espessura do depósito para os casos inclinado e vertical (Fig. 4.10) em relação aos casos horizontais (Fig. 4.7). Este aumento pode ser associado a variação da velocidade superficial do líquido, pois os casos horizontais apresentam velocidade muito mais elevada. O escoamento com velocidades mais baixas permite que haja mais tempo para a troca de calor com o meio externo. Conseqüentemente, o óleo atingirá temperaturas mais baixas, o que induzirá a um aumento de depósito.

#### **4.3.4 Padrão Bolha Vertical**

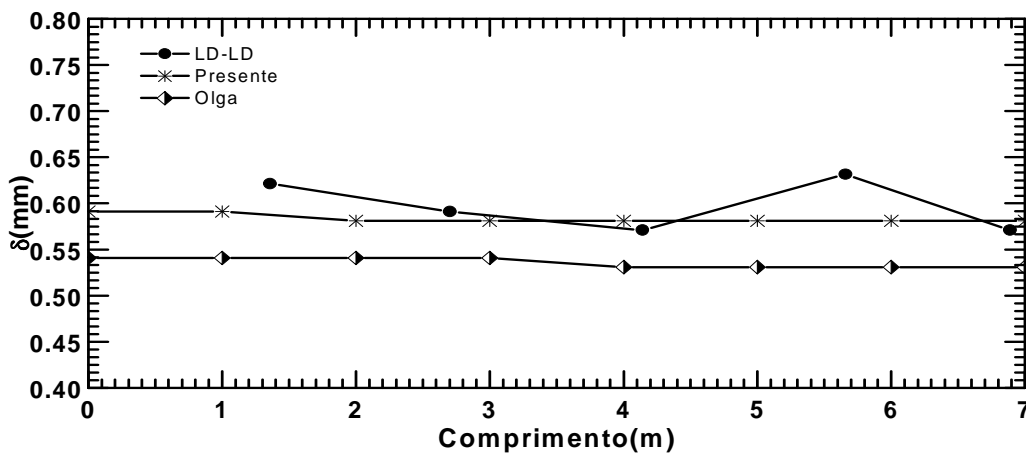
A Figura 4.11 apresenta a distribuição do depósito de parafina para o caso de escoamento no padrão de bolha em uma tubulação vertical (Caso 6). A Figura 4.11a corresponde a distribuição temporal em  $x=7$  m, e a Fig. 4.11b apresenta a distribuição espacial após um período de 24 horas de resfriamento. Mais uma vez observa-se excelente concordância entre os valores preditos com ambas as simulações numéricas e os dados medidos por Matzain (1999) com o método LD-LD. Como nos casos anteriores, a presente metodologia apresenta valores para a espessura do depósito ligeiramente superiores ao preditos pelo programa OLGA 5.3.(Scandpower).

Note que, o presente resultado corrobora a afirmação de que a velocidade

superficial do líquido é o fator preponderante na definição da espessura do depósito. Este caso, apesar de corresponder ao padrão bolha em uma tubulação vertical, foi obtido com a mesma velocidade superficial de líquido que os Casos 1, 2 e 3 correspondentes ao padrão intermitente em tubulações horizontais. Como consequência obteve-se uma espessura do depósito aproximadamente igual a obtida com estes casos.



(a) Evolução temporal da deposição em  $x = 7$  metros



(b) Distribuição espacial da espessura do depósito em  $t = 24$  horas.

**Figura 4.11:** Caso 6:  $V_{sl} = 1,219$  m/s,  $V_{sg} = 0,152$  m/s. Vertical  $\theta=90^\circ$

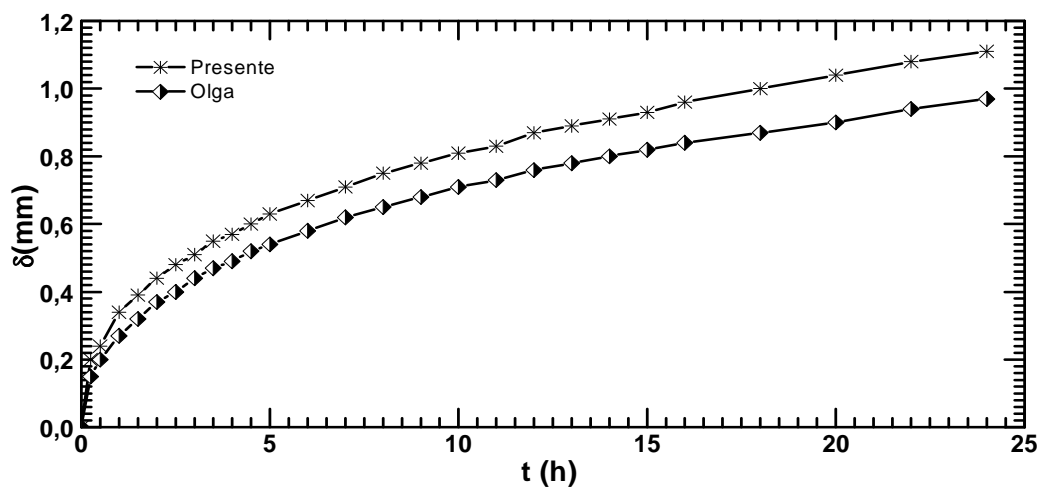
Padrão bolha vertical

#### 4.3.5 Padrão Estratificado

O escoamento estratificado foi obtido com velocidade superficial do líquido e gás iguais a  $V_{sl}=0,061$  m/s e  $V_{sg}=0,305$  m/s. Neste caso Matzain (1999) não

conseguiu utilizar os métodos HT e LD-LD para estimar a espessura do depósito. Em seu trabalho, informa que no caso do padrão estratificado, o depósito concentra-se para a parte inferior da tubulação, e com uma sonda de profundidade mediu a espessura do depósito no final do experimento (após 24 horas) com sendo igual a 2 mm.

A Figura 4.12 apresenta a distribuição temporal do depósito de parafina em  $x = 7$  m obtida com a presente metodologia e com o Programa OLGA 5.3 (Scandpower). Ambos os esquemas numéricos apresentam um incremento maior de depósito nas 5 primeiras horas e tendem assintoticamente para uma espessura de aproximadamente 1 mm, com valores ligeiramente superior obtidos com a presente metodologia. Como os modelos numéricos utilizados consideram o escoamento com unidimensional, o valor da espessura obtido é considerado constante ao longo de toda a periferia. Conseqüentemente, um valor bem inferior ao medido foi obtido. No entanto, como o valor é aproximadamente a metade da espessura obtida no experimento para somente a parte inferior da tubulação, pode-se considerar a previsão como sendo satisfatória.



**Figura 4.12:** Evolução temporal da deposição em  $x = 7$  metros

Caso 7:  $V_{sl} = 0,061$  m/s,  $V_{sg} = 0,305$  m/s. Horizontal. Padrão Estratificado.

A Figura 4.13 apresenta a comparação da evolução temporal do depósito de parafina obtida com os sete casos, em  $x = 7$  m. O resultado apresentado indica que de fato, a velocidade superficial do líquido é o parâmetro governante para a determinação da taxa de deposição. Observa-se que os Casos 1, 2, 3 e 6 apresentam resultados muito próximos, independente do padrão ou orientação da tubulação. Com a redução da velocidade superficial, a espessura do depósito

crece. Os Casos 4 e 7 (intermitente inclinado e estratificado) apresentam a maior espessura e possuem as velocidades mais baixas, com o caso intermitente vertical (Caso 5), com velocidade intermediária apresentando uma espessura intermediária.

Nota-se que apesar da velocidade superficial do líquido no caso estratificado ser bem inferior a dos Casos 4 e 5, a espessura obtida é aproximadamente igual. Uma possível explicação poderia ser que o padrão intermitente e de bolha promovem uma maior mistura que o padrão estratificado, tornando a troca de calor mais eficiente.

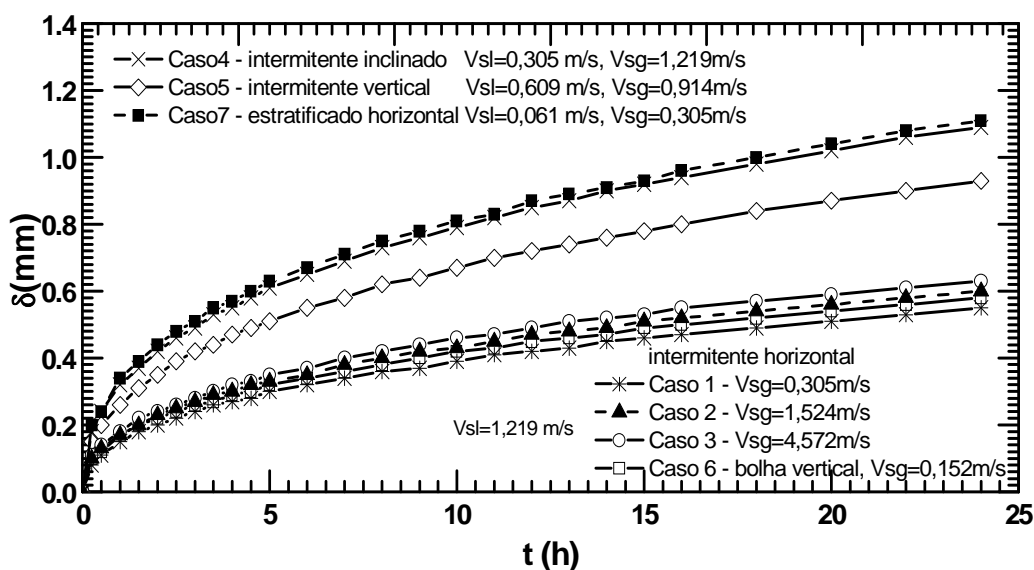


Figura 4.13: Comparação da evolução temporal da deposição em  $x = 7$  metros. Casos 1 a 7

#### 4.3.6 Influência da Presença de Água

Uma vez que os resultados obtidos com a presente metodologia concordam bem os dados medidos por Matzain (1999), investigou-se a influência da fração de água no processo de deposição. Selecionou-se o Caso 2 (escoamento intermitente horizontal) e variou-se a fração de água injetada na entrada de zero a 60%. Na Figura 4.14 apresentam as curvas de deposição de parafina para aumento da fração de água para o Caso 2. Observa-se redução nas espessuras de deposição no final da tubulação para o aumento gradual da presença de água no escoamento. Este resultado é razoável e esperado, já que a parafina dissolvida encontra-se na fase do óleo, ao aumentar a fração de água, a fração de óleo na mistura diminui e

o modelo de difusão molecular utilizado para avaliar a taxa de transporte de massa é proporcional a fração de óleo presente no escoamento.

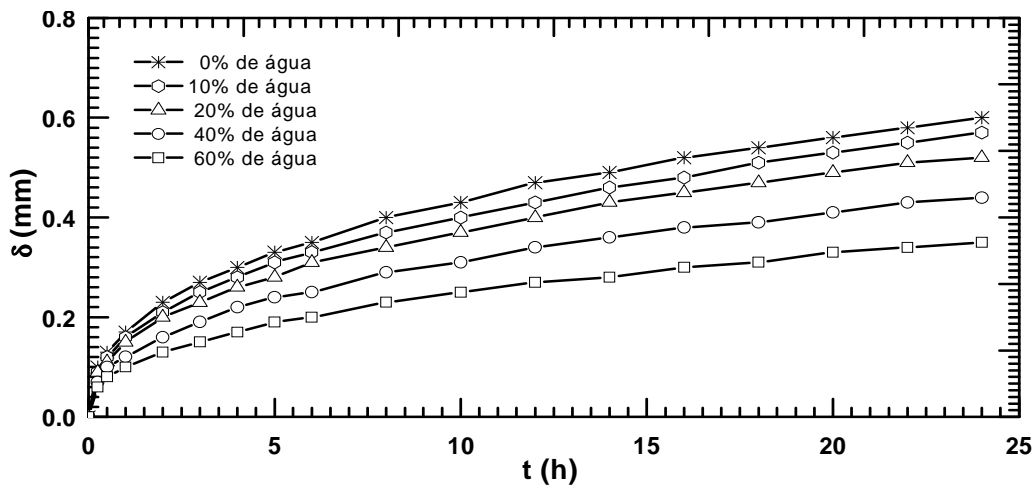


Figura 4.14: Influência da fração de água na evolução temporal da deposição em  $x = 7$  metros. Padrão intermitente horizontal. Caso 2.

#### 4.3.7 Porosidade

Como mostrado no Capítulo 2, a porosidade do depósito de parafina depende do número de Reynolds (Eq. 2.111). Apresentam-se na Tabela 4.4 os valores de porosidade obtidos com a presente metodologia, com o programa OLGA 5.3 (Scandpower) os valores experimentais de Matzain (1999) para um tempo final de 24 horas, em  $x = 7$ m. Observa-se que não ocorreram grandes discrepâncias entre os valores experimentais e valores simulados. Devido a relação direta entre a porosidade e o número de Reynolds, a mesma cai com o aumento do número de Reynolds (Eq. 2.112), o que foi reproduzido nas simulações, como pode ser apreciado na Tabela 4.4. Devido a baixa velocidade superficial do líquido a maior porosidade do depósito foi obtida com o Caso 7, correspondente ao padrão de escoamento estratificado em uma tubulação na horizontal. Os Casos 1, 2, 3 e 6 apresentam a mesma velocidade superficial do líquido, o que resultou em pequena variação da porosidade, em concordância com os dados experimentais obtidos por Matzain(1999). Um dado interessante a ser observado é que o aumento da velocidade superficial do gás, mantendo a velocidade superficial do líquido constante induz a uma redução na porosidade, independente do padrão de escoamento. Este resultado indica que apesar da

espessura do depósito do depósito ser aproximadamente igual, a porosidade cai com a velocidade indicando mais massa de parafina no depósito.

Observa-se que para todos os casos os dados experimentais para a porosidade do depósito foram superiores aos valores simulados, indicando que os valores simulados estão subdimensionando os valores para a porosidade. Finalmente, observa-se que os valores previstos com a presente metodologia se aproximam mais dos dados de Matzain (1999) do que os obtidos com o programa OLGA 5.3 (Scandpower).

**Tabela 4.4:** Porosidade

Casos	Matzain (%)	Presente (%)	erro (%)	Olga (%)	erro
1	53,0	49,0	7,6%	45,0	15,1%
2	56,8	45,0	20,8%	41,0	27,8%
3	50,3	41,0	18,5%	40,0	20,5%
4	63,3	53,0	16,3%	50,0	21,0%
5	57,9	51,0	11,9%	47,0	18,8%
6	54,5	49,0	10,1%	44,0	19,3%
7	82,1	66,0	19,6%	64,0	22,1%

#### 4.3.8

##### **Caso 2 – Distribuição de Pressão, Temperatura e Fração Volumétrica**

Como apresentado no Capítulo 2, a deposição de parafina depende do campo de velocidade, pressão, temperatura e fração volumétrica do líquido. Uma análise destas grandezas pode auxiliar a compreender o fenômeno da deposição. A seguir a distribuição espacial ao longo do duto destas grandezas para diferentes instantes de tempo é apresentada. Matzain (1999) não apresenta nenhuma informação sobre essas grandezas. Foi escolhido o Caso 2, que corresponde ao regime de escoamento no padrão intermitente em tubulação horizontal, com velocidade superficial do gás intermediária entre os Casos 1 e 3.

A Figura 4.15 apresenta a variação da pressão ao longo da tubulação, para diferentes instantes de tempo. Observa-se que a pressão cai linearmente ao longo do duto, indicando que o escoamento se comporta como desenvolvido. Porém, nota-se uma aumento da inclinação a medida que o tempo passa, indicando o

aumento da perda de carga provocado pela diminuição da área da seção transversal do duto.

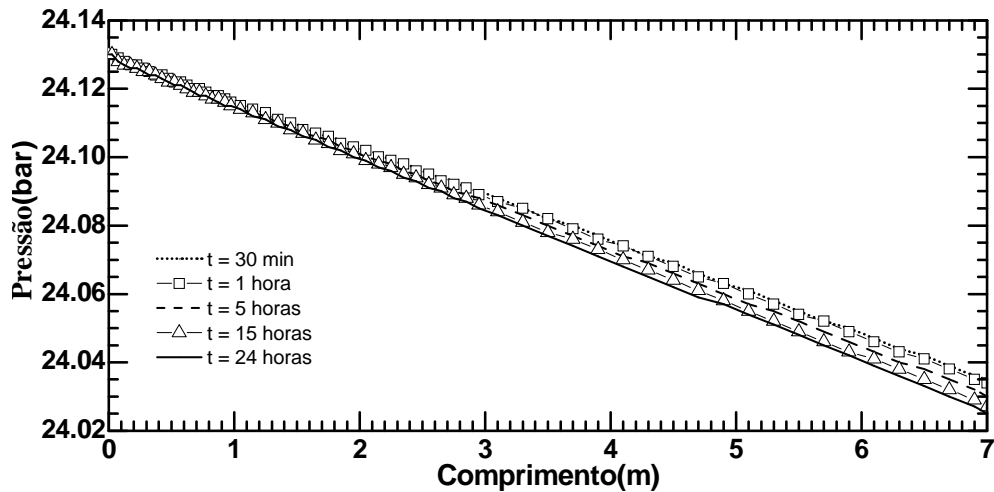


Figura 4.15: Evolução Temporal da Pressão ao Longo do Duto.

A distribuição espacial da fração volumétrica para os mesmos instantes de tempo apresentados na Fig. 4.15 é ilustrada na Figura. 4.16, enquanto que a Fig. 4.17 apresenta a distribuição das velocidades superficiais do gás e do líquido. Observa-se na Fig. 4.16 que, apesar de haver somente uma pequena variação da fração volumétrica do líquido ao longo da tubulação, esta cai devido a evolução de gás de solução. Inicialmente a distribuição é mais uniforme ao longo do duto, aumentando a não uniformidade a medida que o tempo passa. O caráter transiente do escoamento pode ser observado, ao notar que a distribuição da fração volumétrica do líquido cai após 5 horas do resfriamento, voltando a subir, para instantes de tempo maiores.

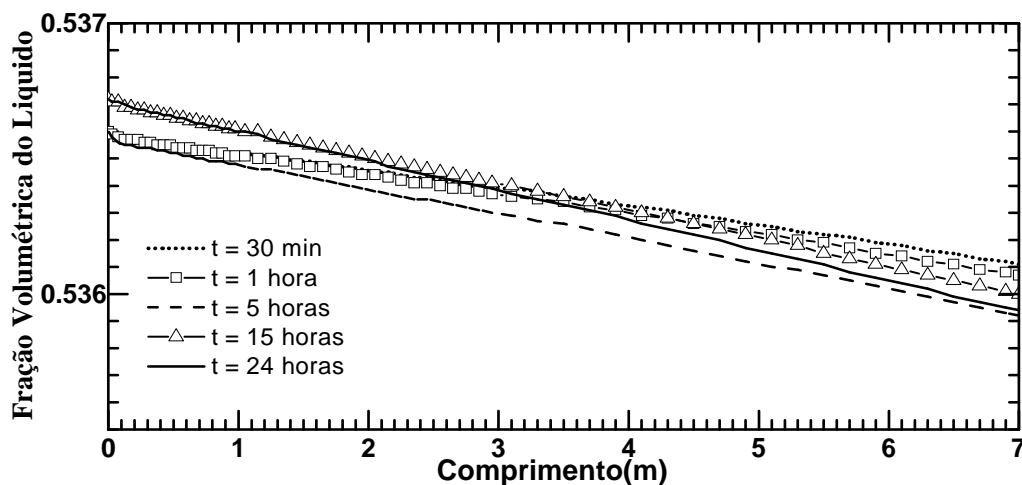
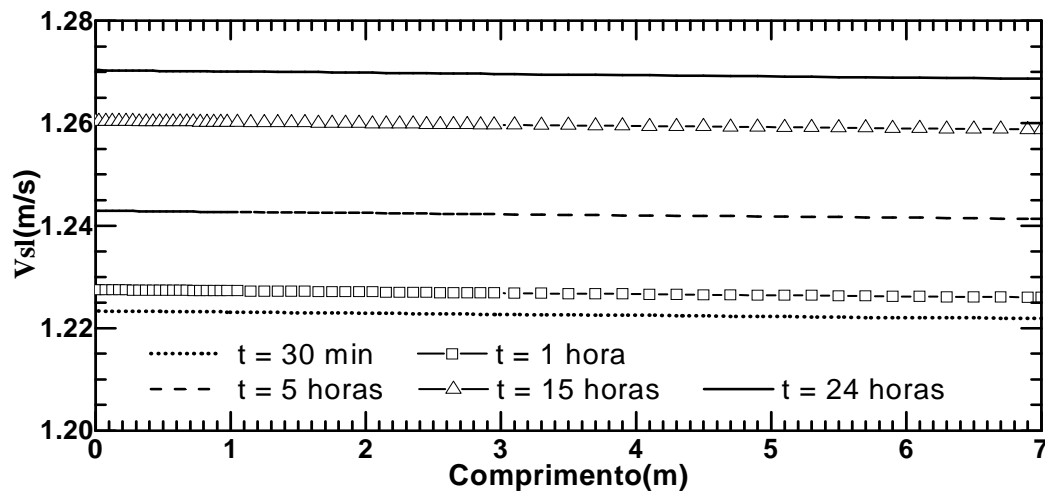
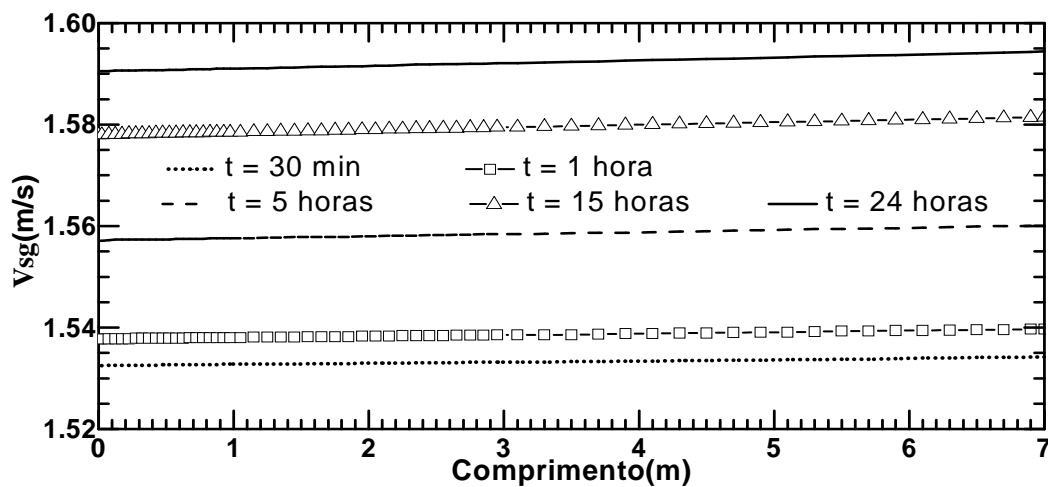


Figura 4.16: Evolução Temporal do *Holdup* do Líquido ao longo do Duto. .

A diminuição da área da seção transversal devido ao depósito, juntamente com a diminuição da fração volumétrica do líquido, induz a um aumento das velocidades superficiais do líquido e do gás a medida que o tempo passa, conforme apresentado na Fig. 4.17. O aumento da velocidade média da mistura também colabora para o aumento das parcelas de perda de carga.



(a) Velocidade superficial do líquido



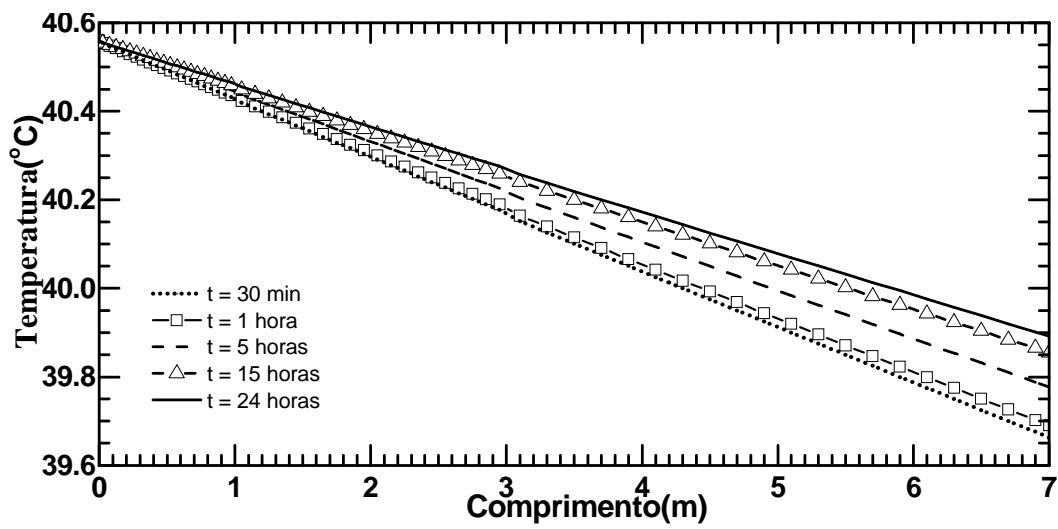
(b) Velocidade superficial do gás

**Figura 4.17:** Evolução Temporal das Velocidades Superficiais ao Longo do Duto.

A Figura 4.18 apresenta a variação da temperatura do escoamento ao longo da tubulação para diferentes instantes de tempo. Observa-se a queda de temperatura devido a troca térmica entre o fluido e o meio ambiente. A medida que o tempo passa a resistência térmica interna a tubulação aumenta, devido a diminuição do diâmetro interno da tubulação provocado pela deposição de parafina. Devido a isto, o coeficiente de calor global diminui reduzindo o fluxo de calor, resultando em maiores valores de temperatura média na saída da tubulação.



A maior taxa de transferência de calor nos tempos iniciais resulta em maiores taxas de deposição de parafina, o que pode ser observado na Fig. 4.6, que apresenta a evolução temporal do depósito na saída da tubulação. Pode-se mencionar ainda que os níveis mais altos de temperatura, nos instantes de tempo finais induz a um declínio dos valores da fração volumétrica do líquido ao longo da tubulação decorrente do menor crescimento da fração volumétrica do gás ocasionado pelas menores temperaturas média do escoamento.



**Figura 4.18:** Evolução Temporal da Temperatura Média do Escoamento ao longo do Duto.