4
Comparação com Dados de Laboratório

Neste capítulo utilizaremos os dados experimentais obtidos em laboratório, em condições controladas por Matzain (1999) para comparação com os resultados obtidos com o modelo de deposição convectivo proposto neste trabalho. Para tanto foram selecionados alguns casos que representassem de maneira significativa as diversas condições de análise no que se refere à orientação do escoamento e padrão de fluxo. Os resultados obtidos também são comparados com os resultados de Cruz (2011), que utilizou um modelo de deposição por difusão molecular para prever o mesmo conjunto de dados experimentais.

Para realizar a comparação, procurou-se representar o mais próximo possível no modelo proposto as condições utilizadas nos experimentos desenvolvidos por Matzain (1999), conforme descrição nos itens seguintes.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

4.1
Configuração da Seção de Teste

A geometria desenvolvida no experimento de Matzain (1999), também representada no estudo de Cruz (2011), considera um tubo na forma anular com o fluido de análise escoando pelo centro e um fluido de resfriamento pelo anular. As características do tubo estão descritas na Tabela 4.1

Tabela 4.1: Características do Tubo

Comprimento	Diâmetro Interno	Espessura de Parede	Rugosidade Relativa	Condutividade Térmica
7 m	0,0508 m	0,0030 m	0,02	17,3 W/mK

Os casos analisados consideraram como pressão (P_{int}) e temperatura (T_{int}) de entrada os valores de 24,13 bar e 40,6°C, respectivamente.

Glicol foi utilizado para resfriamento em contra fluxo com vazão de Q_{gl}=318 m³/d e temperatura de entrada de T_{ext} = 15,6 °C.

Propriedades físicas consideradas para o glicol foram: massa específica

ρ_{gl} = 1113,2 kg/m^3, viscosidade μ_{gl} = 0,0216 Pa.s, condutividade térmica k_{gl} = 0,596 W/(mK) e calor específico à pressão constante Cp_{gl} = 2756,0 J/(kgK)

A condutividade térmica do tubo utilizou-se o valor sugerido no experimento de Matzain, 17,3 W/mK. Enquanto o coeficiente de filme para a convecção externa foi obtido a partir da correlação de Petukhov (1970) para o número de Nusselt, eq. 4.1.

$$Nu = \frac{h_e\, D_h}{k_{gl}} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) Re\, Pr}{1{,}07 + 12{,}7\sqrt{\frac{f}{8}}\left(Pr^{2/3} - 1\right)} \left(\frac{\mu_{gl,b}}{\mu_{gl,w}}\right)^{\eta} \tag{4.1}$$

onde o diâmetro hidráulico é igual diferença entre os diâmetros externo e interno do duto anular $D_h = D_{an,e} - D_{an,i}$. Os números de Reynolds e Prandtl relacionados com o escoamento externo à seção de teste (espaço anular) são assim definidos

$$Re = \frac{\rho_{gl}\, Q_{gl}\, D_h}{A_{an}\mu_{gl}} \quad ; \quad Pr = \frac{\mu_{gl}\, C_{P_{gl}}}{k_{gl}} \tag{4.2}$$

Na correlação indicada em eq. (4.1), adotaram-se os seguintes valores: η=0,25 e $\mu_{gl,b}/\mu_{gl,w}$ =1,25, conforme sugerido por Matzain (1999), e a equação utilizada para o fator de atrito

$$f = (1{,}82 \log Re - 1{,}64)^{-2} \tag{4.3}$$

A resistência térmica devido ao depósito de parafina quando este se inicia é definido nesta análise estabelecendo-se a condutividade térmica da parafina.

A condutividade térmica do depósito de parafina na parede interna do duto utilizou-se a correlação proposta por Matzain (1999)

$$\frac{k_w}{k_o} = 1{,}83 - 0{,}82\, \phi \quad ; \quad \phi = 1 - \frac{1}{8} R_{ef}^{0{,}15} \tag{4.4}$$

onde k_o é a condutividade do óleo e ϕ a porosidade do depósito formado, preenchida com óleo, e definida de acordo Matzain (1999), sendo R_{ef} o número de Reynolds da fase líquida,

$$R_{ef} = \frac{\rho_o v_l\, (2\, r_i)}{\mu_o} \tag{4.5}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

ρ_o, μ_o são massa específica e viscosidade absoluta do óleo.

4.2
Caracterização do Fluido

As características do fluido ensaiado estão descritas na Tabela 4.2. A composição encontra-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.2: Características do Fluido

Razão Gás/Óleo (m^3/m^3)	API	Gravidade específica do gás	TIAC (°C)
15,5	35	0,7	51

Tabela 4.3: 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

De acordo com a caracterização obtida por Cruz (2011) para o fluido do experimento, utilizando o aplicativo PVTsim 18 (CALSEP, 2010), constatou-se a seguinte dependência das condutividades térmicas do óleo e do gás com a temperatura, para um valor médio de pressão de 24 bar.

$$k_l = 0{,}1314 - 3\times10^{-4}\,T \quad ; \quad k_g = 0{,}0362 + 4\times10^{-5}\,T \qquad (4.6)$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

Devido à reduzida dependência do calor específico à pressão constante, com a pressão e temperatura, para a faixa de utilização das experiências, valores constantes foram especificados, e encontram-se ilustrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Calor específico à pressão constante para os fluidos

Cp_l (J/kgK)	Cp_g (J/kgK)
2283	2044

Curva de Solubilização da Parafina

A partir da composição da Tabela 4.3, Cruz (2011) obteve a curva de cristalização da parafina, ilustrada Figura 4.1, utilizando o programa PVTsim 18 (Calsep). Este resultado concorda com a curva obtida por Bruno et al (2008). A curva de solubilização foi então ajustada por Cruz (2011) utilizando-se um polinômio de 3° grau para a faixa de temperatura de interesse do experimento.

$$w_{sol} = 3 \times 10^{-7} T^3 - 3 \times 10^{-5} T^2 + 1{,}4 \times 10^{-3} T + 0{,}0324 \qquad (4.7)$$

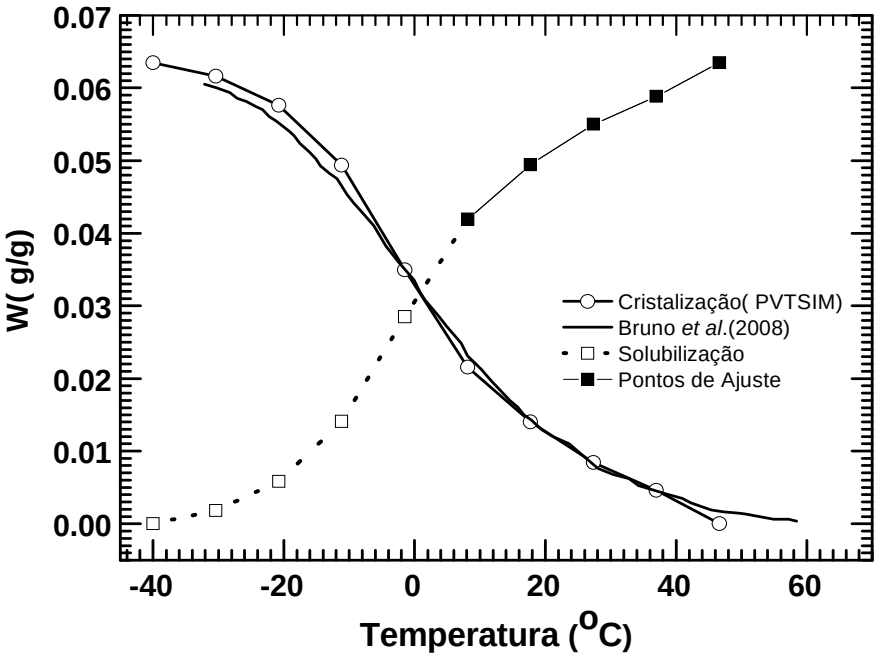


Figura 4.1: Curva de solubilização de parafina.

As demais propriedades do fluido, como a massa específica, viscosidade, fator volume de formação e razão de solubilidade, entre outras, foram obtidas por correlações *black-oil* (Beggs e Brill, 1984).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

4.3
Casos Investigados

Em seu estudo, Matzain (1999) investigou a influência do padrão de escoamento e inclinação da tubulação na taxa de deposição. Para avaliar a metodologia proposta no presente trabalho, nove casos estudados por Matzain (1999) foram selecionados, de modo a buscar uma abrangência na análise de diversos padrões de escoamento e orientação de fluxo. As principais características destes casos encontram-se resumidas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Casos Estudados

	v_{sl} (m/s)	v_{sg} (m/s)	Padrão de Fluxo	Ângulo Horizontal (graus)
Caso 1	1,219	0,305	Intermitente	0
Caso 2	1,219	1,524	Intermitente	0
Caso 3	1,219	4,572	Intermitente	0
Caso 4	0,061	0,305	Estratificado	0
Caso 5	0,061	9,144	Anular	0
Caso 6	0,305	1,219	Intermitente	2
Caso7	0,609	0,914	Intermitente	90
Caso 8	1,219	0,152	Bolha	90
Caso 9	0,153	6,096	Anular	90

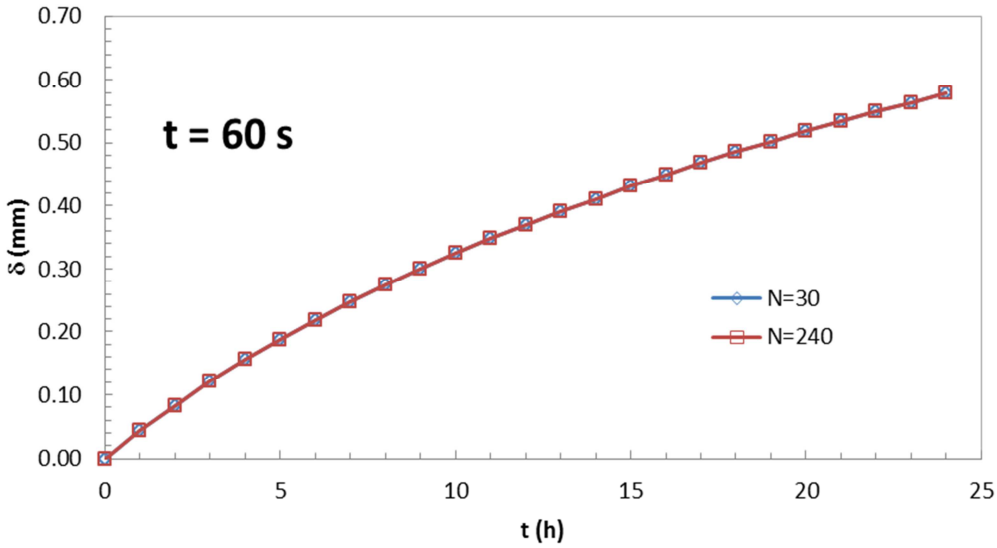
Antes de realizar a investigação do desempenho do modelo convectivo, realizou-se um teste de malha e passo de tempo para selecionar os parâmetros numéricos adequados ao problema. Investigou-se também a influência das correlações empíricas para determinação do coeficiente de transferência de calor para os diferentes padrões de escoamento. Estes testes são apresentados a seguir.

4.4
Teste de Malha

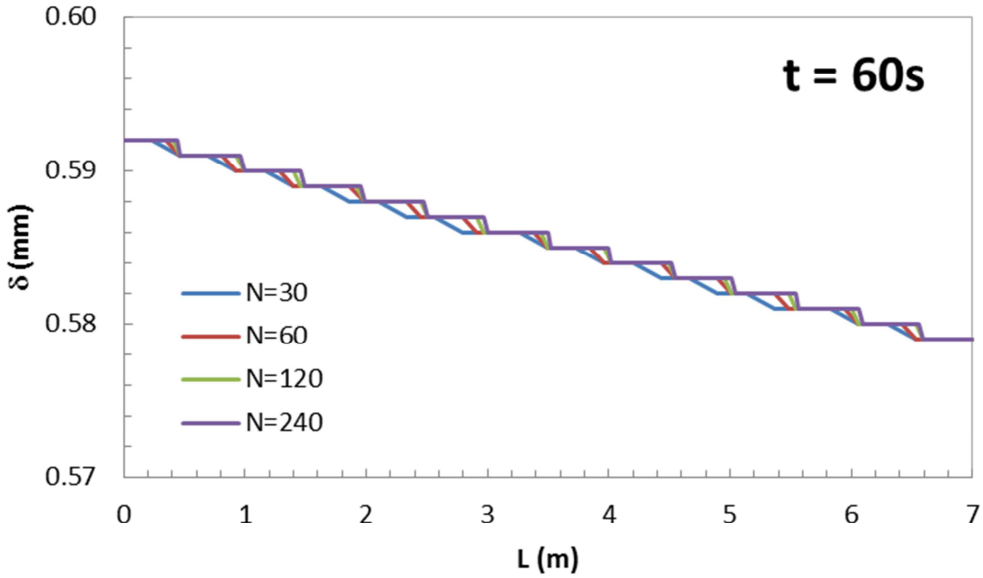
Para verificar a sensibilidade da solução aos erros de discretização devidos à construção da malha de discretização espacial, realizou-se uma série de testes para diferentes números de nós, com distribuição uniforme ao longo da linha. Os resultados foram obtidos utilizando como referência o Caso 1, do experimento de Matzain, indicado na Tabela 4.5.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

A Fig. 4.2a apresenta a variação temporal da espessura do depósito no final da seção de teste, enquanto que a Fig. 4.2b apresenta a variação espacial, após 60s do início do experimento. Os resultados indicados na Fig. 4.2, indicam reduzida sensibilidade ao número de células de discretização para valores entre 30 e 240 nós e passo de tempo de 60 segundos.



(a) Variação temporal em x=L



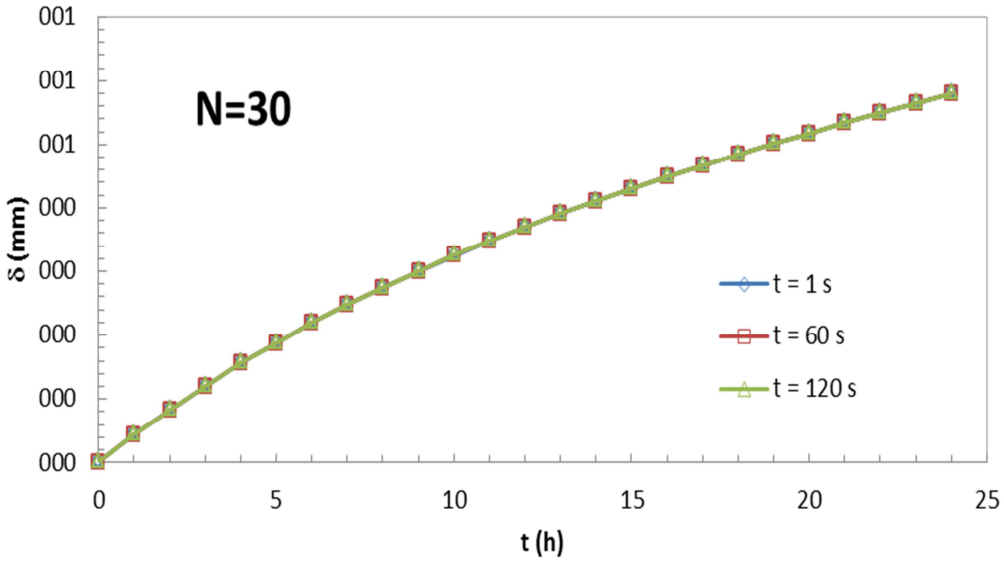
(b) variação espacial após 60s

Figura 4.2: Influência da malha na espessura do depósito. Caso 1.

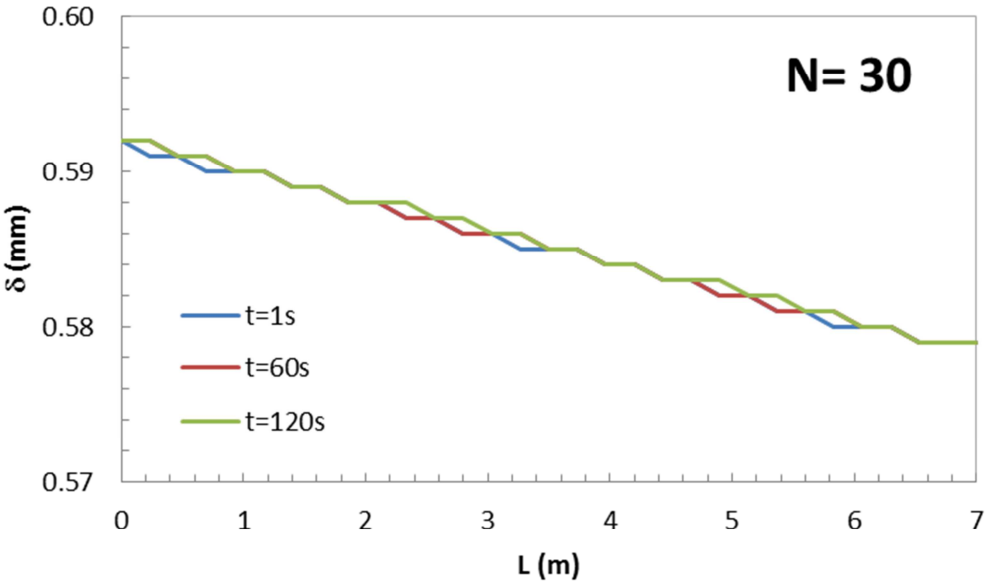
Utilizando a malha com 30 nós, a influência do passo de tempo é apresentada na Fig. 4.3. Como no teste anterior, a Fig. 4.3a apresenta a variação temporal da espessura do depósito no final da seção de teste, enquanto que a Fig.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

4.3b apresenta a variação espacial, após 60s do início do experimento. Nota-se uma diferença desprezível na espessura do depósito, quando se utilizam passos de tempo de 1s, 60s e 120s. Neste caso, a maior diferença observada, considerando a variação temporal e geométrica, foi igual a 0,4%.



(a) Variação temporal em x=L



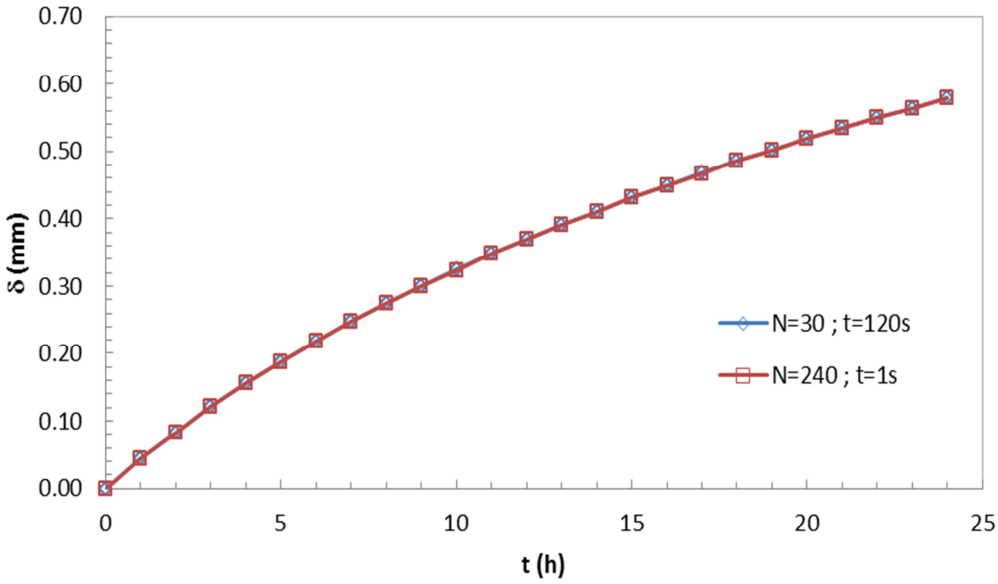
(b) variação espacial após 60s

Figura 4.3: Influência do passo de tempo na espessura do depósito. Caso 1.

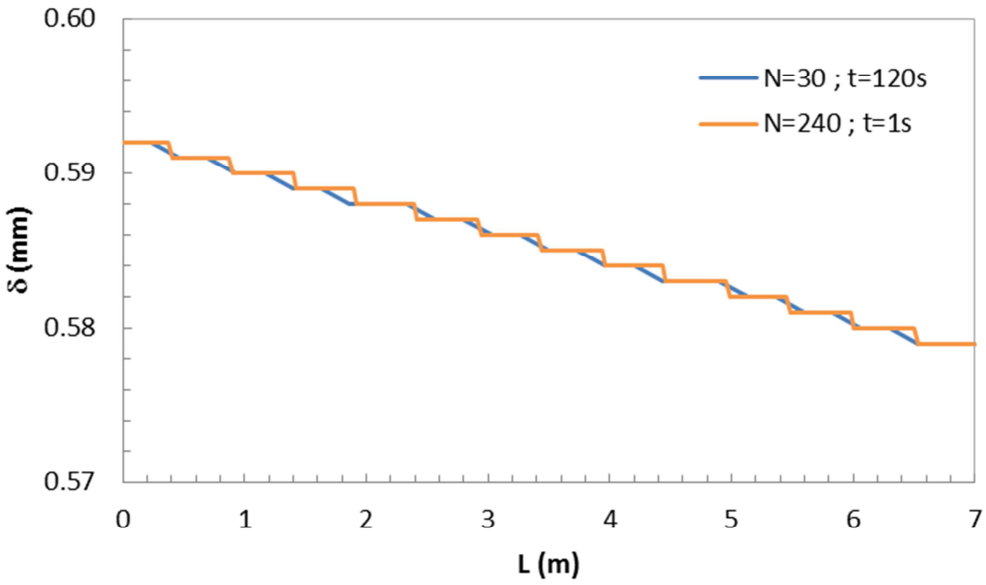
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

Combinando a variação do número de nós e de passo de tempo observa-se que a maior diferença entre uma malha com 30 pontos e passo de tempo de 120s e outra com 240 pontos e passo de tempo de 1s é de 0,4%, conforme observado na Fig. 4.4, tanto com relação a variação temporal (Fig. 4.4a) quanto à variação espacial (Fig. 4.4b).

Com esses resultados decidiu-se utilizar uma malha espacial com 60 nós de discretização e um passo de tempo de 60 segundos nos estudos comparativos com os dados experimentais de Matzain (1999) e numéricos de Cruz (2011).



(a) Variação temporal em x=L



(b) variação espacial após 60s

Figura 4.4: Influência da malha e passo de tempo na espessura do depósito. Caso 1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

4.5
Correlações de Transferência de Calor

De acordo com literatura atual, as seguintes correlações para cálculo do coeficiente interno de transferência de calor por convecção (coeficiente de filme), em função da orientação de escoamento e padrão de fluxo, podem ser utilizadas.

Tabela 4.6: Correlações de cálculo para h_{in} conforme literatura atual

Padrão de Escoamento	Correlação para h_{in}
Escoamento Horizontal ($-15° \leq \theta \leq +15°$)	
Bolha	*Chu e Jones* *Vijay et al.* *Shah*(1)
Golfada	*Chu e Jones* *Ravipudi e Godbold*
Estratificado	*Davis et al.*
Anular	Davis e David *Ravipudi e Godbold (b=0.123)*
Névoa	Davis e David Knott et al. Shah(1)
Escoamento Vertical ($+15° \leq \theta \leq 90°$)	
Bolha	*Vijay et al.* *Shah*(1)
Golfada	*Aggour* *Ravipudi e Godbold (para Re_{sl} > 2000)* *Rezkallah e Sims (para Re_{sl} > 2000)*
Caótico	*Aggour (para Re_{sl} > 2000)* Shah(1) *Vijay et al. (para Re_{sl} > 2000)* Knott et al. *(para Re_{sl} > 2000)*
Anular	*Ravipudi e Godbold (b=0.26)* *Chu e Jones*
Névoa	Idem para horizontal

(1) com a=1.0 e b=0.25, sendo h_{sl} calculado com a correlação adequada para regime laminar ou turbulento

A título de comparação, o trabalho de Matzain (1999) propõe as seguintes correlações.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

Tabela 4.7: Correlações de cálculo para h_{in} conforme sugestão de Matzain

Padrão de Escoamento	**Correlação para h_{int}**
Escoamento Horizontal (-15° ≤ θ ≤ +15°)	
Intermitente (Bolhas alongadas e Golfada)	*Kudirka et al.*
Estratificado	*Sieder e Tate*
Anular	*Shah*
Névoa	Knott et al.
Escoamento Vertical (+15° ≤ θ ≤ 90°)	
Bolha	*Aggour*
Golfada	*Rezkallah e Sims (para Re_{sl} > 2000)*
Caótico	*Rezkallah e Sims (para Re_{sl} > 2000)*
Anular	*Ravipudi e Godbold (b=0.26)*
Névoa	Knott et al.

Para testar a influência da correlação do coeficiente de filme interno, as correlações descritas na Tabela 4.8 foram analisadas no presente trabalho.

Tabela 4.8: Correlações de cálculo para h_{in} utilizadas no estudo

#	**Correlação**	**Orientação do Escoamento**	**Padrão de Fluxo**
1	Shah (1981)	Horizontal	Bolha, Névoa ou Anular
		Vertical	Bolha ou Caótico
2	Kudirka et al (1965)	Horizontal	Golfada ou Bolhas Alongadas
3	Sieder e Tate (1936)	Horizontal	Estratificado
4	Rezkallah e Sims (1987)	Vertical	Golfada
5	Aggour (1978)	Vertical	Bolha
6	Ravipudi e Godbold (1978)	Horizontal e Vertical	Golfada
7	Aggour (1978) corrigida por Kim et al. (1999)	Vertical	Golfada

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

8	Ravipudi e Godbold (1978) corrigida por Kim et al. (1999)	Horizontal	Anular
9	Ravipudi e Godbold (1978) corrigida por Kim et al. (1999)	Vertical	Anular
10	Davis e David (1964)	Horizontal e Vertical	Anular

Uma análise de sensibilidade das correlações empíricas para o coeficiente de transferência de calor interno na obtenção do padrão de escoamento e espessura do depósito foi realizada. A Tabela 4.9 indica as correlações testadas para cada caso e o padrão de fluxo obtido, assim como o padrão observado por Matzain (1999).

Tabela 4.9: Correlações para h_{in} utilizadas e padrões obtidos em cada caso

	Ângulo (graus)	**Padrão de Fluxo (presente)**	**Correlações testadas de h_{in}**	**Padrão de Fluxo (Matzain)**	**Correlações Selecionadas de h_{in}**
Caso 1	0	Intermitente	(2) e (6)	Intermitente	(2)
Caso 2	0	Intermitente	(2) e (6)	Intermitente	(2)
Caso 3	0	Intermitente	(2) e (6)	Intermitente	(2)
Caso 4	0	Transição	(3)	Estratificado	(3)
Caso 5	0	Névoa	(1),(8) e (10)	Anular	(1)
Caso 6	2	Intermitente	(2) e (6)	Intermitente	(2)
Caso 7	90	Intermitente	(4), (6) e (7)	Intermitente	(4)
Caso 8	90	Bolhas	(1) e (5)	Bolhas	(5)
Caso 9	90	Intermitente	(9) e (10)	Anular	(9)

Note que o padrão previsto para os Casos 4, 5 e 9 não corresponde ao padrão observado por Matzain. Esse fato pode ser explicado pela utilização de diferentes mapas de fluxo utilizado pelos modelos. Matzain (1999) utilizou a biblioteca computacional FLOPAT para gerar os mapas de fluxo associado a geometria, fluidos e velocidades utilizadas no seu experimento. A Fig. 4.5 ilustra o mapa de padrão utilizado por Matzain (1999). Estes mapas foram utilizados como guia para formulação da matriz de teste. Além disso, uma série de testes foi

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

realizada para comprovar a viabilidade de uso dos mapas no experimento. Já o TRANSFLUX (Stuckenbruck, 1994) utiliza o mapa de fluxo de Taitel e Dukler (1976). Para obtenção dos mesmos padrões do experimento de Matzain (1999) utilizou-se como referência as velocidades superficiais de líquido e gás indicadas para reproduzir as mesmas condições no presente modelo.

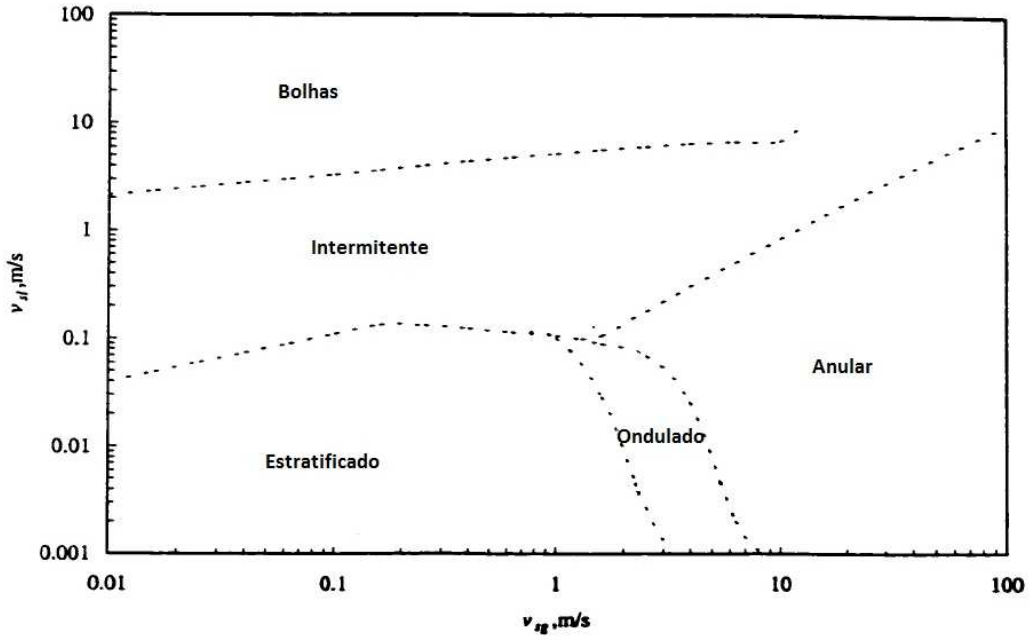
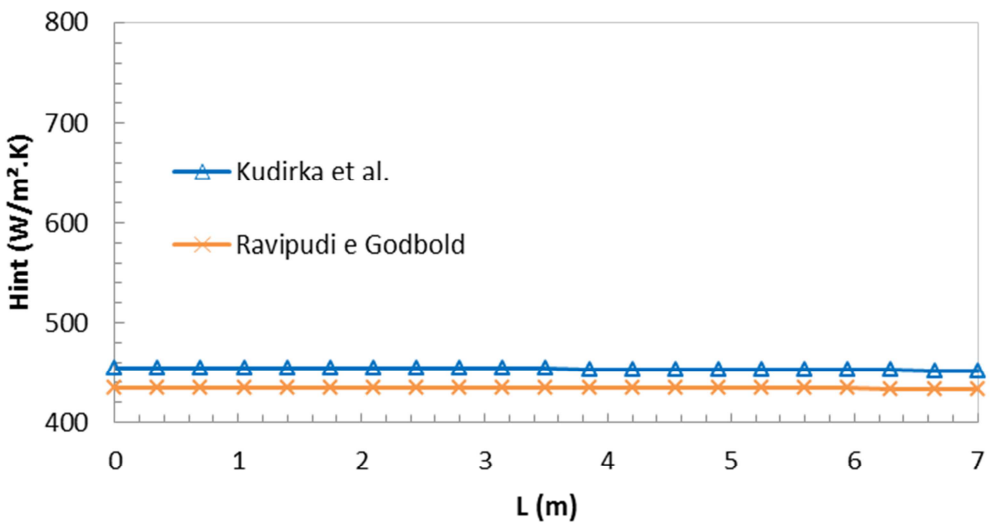


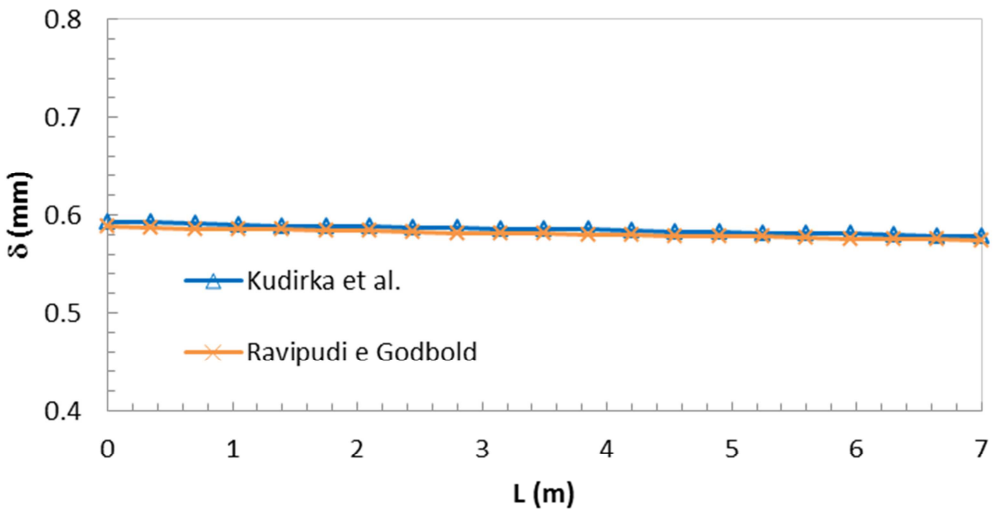
Figura 4.5: Mapa de Fluxo gerado pelo Matzain (1999)

As Figs. 4.6, 4.7 e 4.8 apresentam o perfil axial do coeficiente de filme interno e da espessura de depósito após 24 horas do início do resfriamento, para os Casos 1, 5 e 8. Estes casos foram selecionados por serem considerados representativos para a distribuição dos padrões de fluxo e orientação do escoamento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA



(a) Coeficiente de filme interno



(b) espessura do depósito

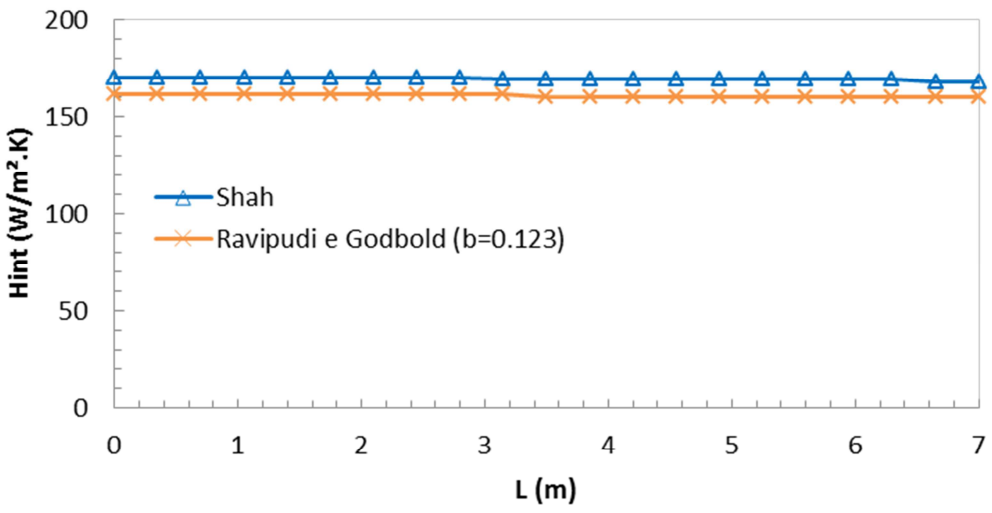
Figura 4.6: Influência das correlações de Kudirka et al (1965) e Ravipudi e Godbold (1978). Caso 1, t= 24 horas.

Analisando a Fig. 4.6, correspondente ao Caso 1, escoamento horizontal, observa-se que as correlações de Kudirka et al (1965) e Ravipudi e Godbold (1978) apresentam resultados análogos, muito próximos. Neste caso, o padrão de escoamento, sendo a variação axial do coeficiente de filme interno e da espessura do depósito são desprezíveis.

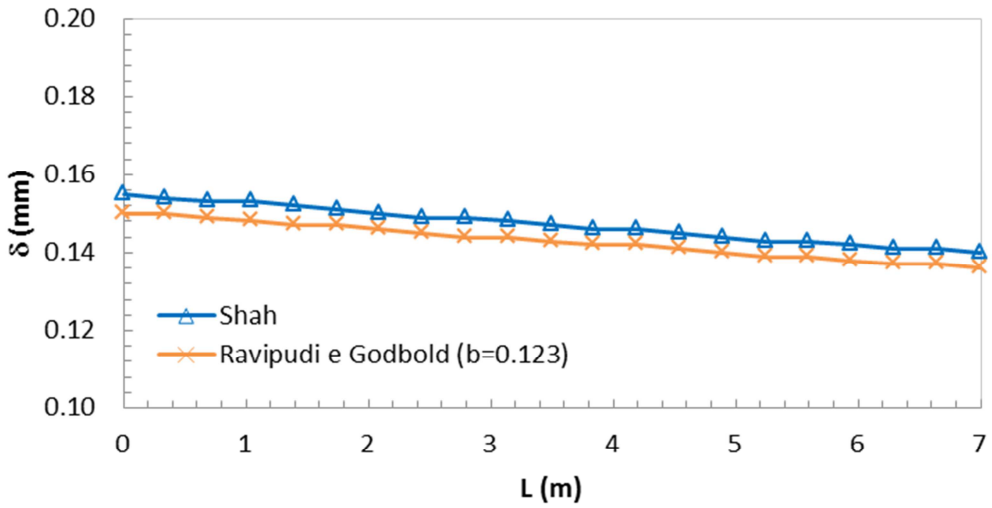
Os resultados do Caso 5 correspondente a escoamento horizontal encontram-se na Fig. 4.7. Neste caso, o padrão observado por Matzin foi anular, enquanto no presente trabalho obteve-se o padrão névoa. A correlação de Shah (1981) fornece resultados ligeiramente maiores que a correlação de Ravipudi e

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

Godbold (1978) corrigida por Kim et al. (1999). Neste caso é interessante notar que o uso de ambas as correlações fornecem uma espessura de depósito decrescente ao longo do canal.



(a) Coeficiente de filme interno



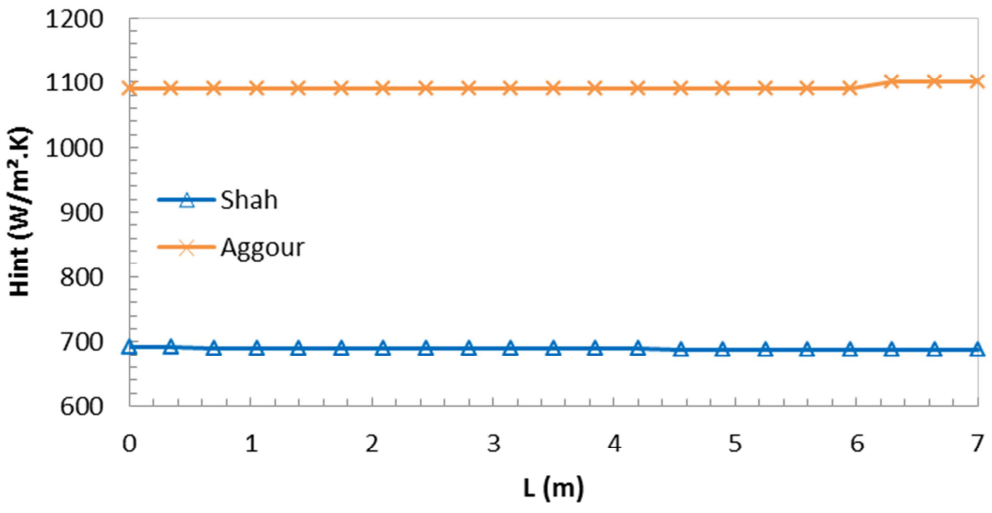
(b) espessura do depósito

Figura 4.7: Influência das correlações de Shah (1981) e Ravipudi e Godbold(1978). corrigida por Kim et al. (1999). Caso 5, t= 24 horas (b=0.123)

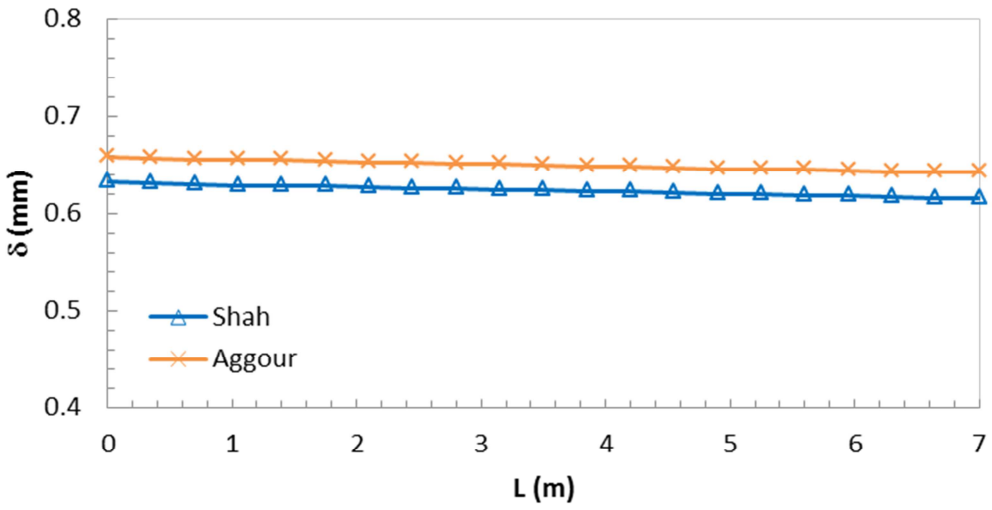
O Caso 8 corresponde a escoamento vertical e o padrão obtido foi de bolhas dispersas. As variações axiais do coeficiente de filme interno e da espessura do depósito são apresentadas na Fig. 4.8. O uso da correlação de Aggour (1978) forneceu uma coeficiente de filme mais alto do que a correlação do Shah (1981), resultando em uma espessura de depósito maior. Como no caso anterior, a

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

variação axial do coeficiente de filme interno e da espessura do depósito foram desprezíveis.



(a) Coeficiente de filme interno

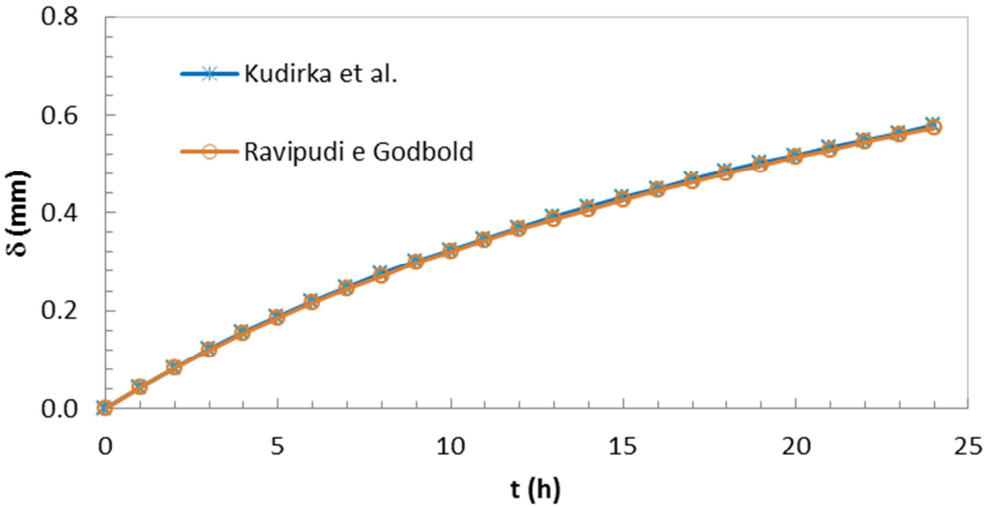


(b) espessura do depósito

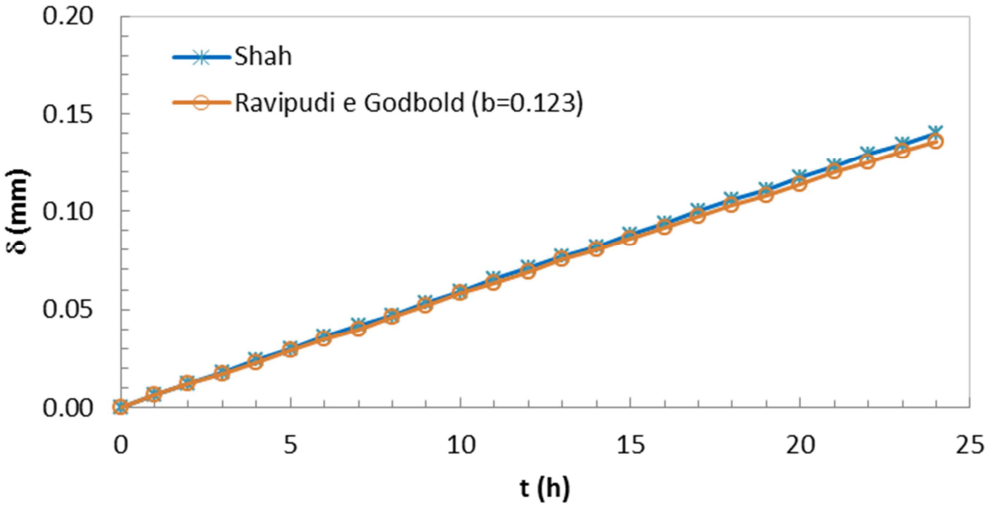
Figura 4.8: Influência das correlações de Shah (1981) e Aggour (1978). Caso 8, t= 24 horas.

A distribuição temporal da espessura do depósito na saída do canal é apresentada na Fig. 4.9, para os Casos 1, 5 e 8, e respectivas correlações empíricas. Observa-se que as correlações escolhidas não apresentam influência significativa na previsão da espessura do depósito. Os Casos 1 e 8 apresentam um crescimento da espessura do depósito no início do transiente um pouco mais forte após 2 hr. Porém, o Caso 5 apresenta um crescimento linear do depósito com o tempo.

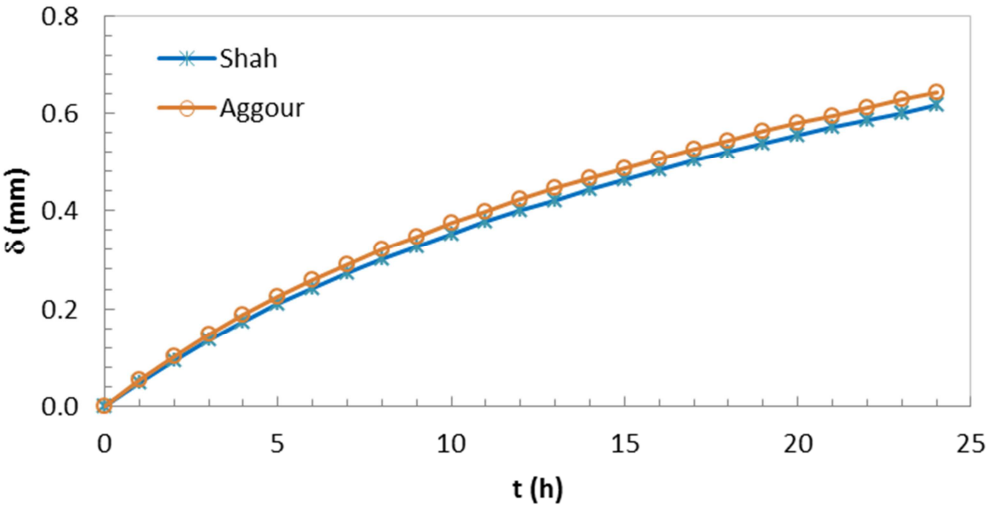
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA



(a) Caso 1 - correlações de Kudirka et al.(1965) e Ravipudi e Godbold (1978)



(b) Caso 5 - correlações de Shah (1981) e Ravipudi e Godbold(1978). corrigida por Kim et al. (1999)



(c) Caso 8 - correlações de Shah (1981) e Aggour (1978)

Figura 4.9: Variação temporal da espessura do depósito na extremidade do duto

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

As análises para os demais casos apresentaram resultados similares. Ou seja, não há diferença significativa quando a correlação é escolhida adequadamente, conforme o padrão de fluxo e orientação do escoamento. Desta forma, os estudos neste trabalho serão considerados utilizando as correlações selecionadas e indicadas na Tabela 4.8.

4.6 Comparação entre Modelo Difusivo e Convectivo

Matzain (1999) realizou uma série de experimentos controlados em laboratório para avaliar a influência do padrão de fluxo e da orientação do escoamento na deposição de parafina. Cruz (2011) verificou o desempenho do modelo difusivo comprando com os dados experimentais de Matzain. Verificou boa concordância, somente ao utilizar os coeficientes de correção sugeridos pelo próprio Matzain.

Nesta seção, os resultados obtidos para a espessura do depósito de parafina, utilizando o modelo convectivo, são comparados com os dados experimentais de Matzain e os dados do modelo de difusão obtidos por Cruz (2011). Os nove caos selecionados e indicados na Tabela 4.5 foram testados.

Matzain (1999) obteve dados experimentais utilizando três metodologias. A primeira, denominada HT-1, considera que a condutividade térmica da parafina é igual à condutividade térmica do óleo. A segunda, denominada HT-2, considera a condutividade térmica da parafina igual ao dobro da condutividade térmica do óleo. A terceira metodologia, denominada LD-LD, é baseada no modelo numérico proposto por Matzain (1999), onde a espessura do depósito é calculada em função de medições de temperatura, pressão, vazão de óleo e vazão de gás.

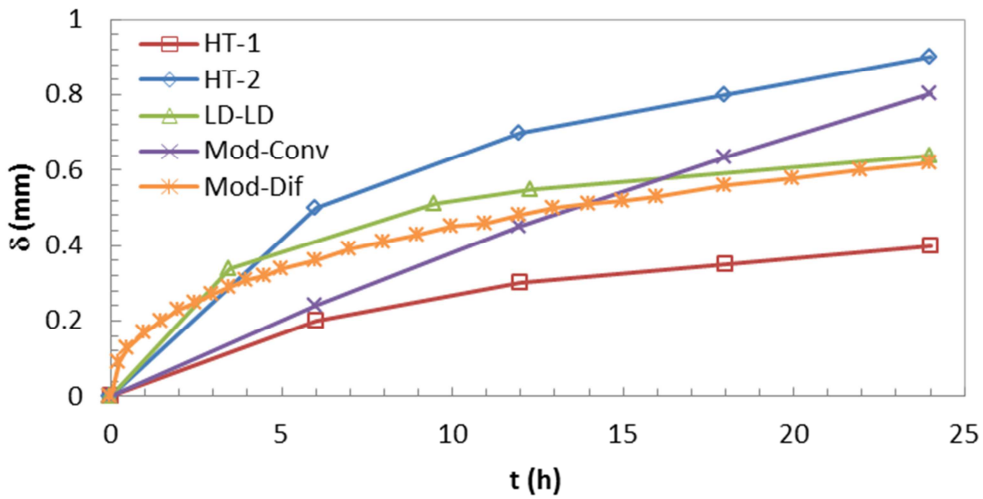
A metodologia numérica desenvolvida utilizando o modelo de deposição de difusão por Cruz (2011) é apresentada sob a denominação de Mod-Dif. O modelo convectivo desenvolvido neste trabalho é referenciado com Mod-Conv.

Os modelos de deposição são avaliados através da comparação da variação temporal da espessura do depósito na saída da tubulação, e da variação espacial do depósito num período de 24 horas, após o início do resfriamento.

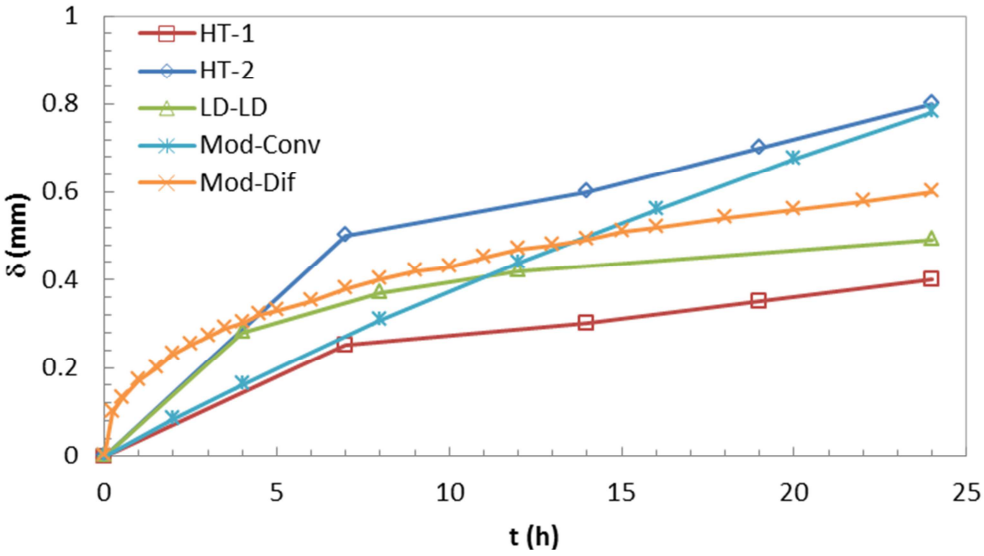
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

4.6.1
Escoamento Horizontal

Os Casos 1, 2 e 3 referem-se à condição de escoamento horizontal com padrão de fluxo intermitente, com diferentes pares de velocidades superficiais, conforme indicado na Tabela 4.5. A Fig. 4.10 apresenta as espessuras de depósito de parafina para a última seção do duto (*L*=7m), observadas ao longo de 24 horas para diferentes métodos de solução.

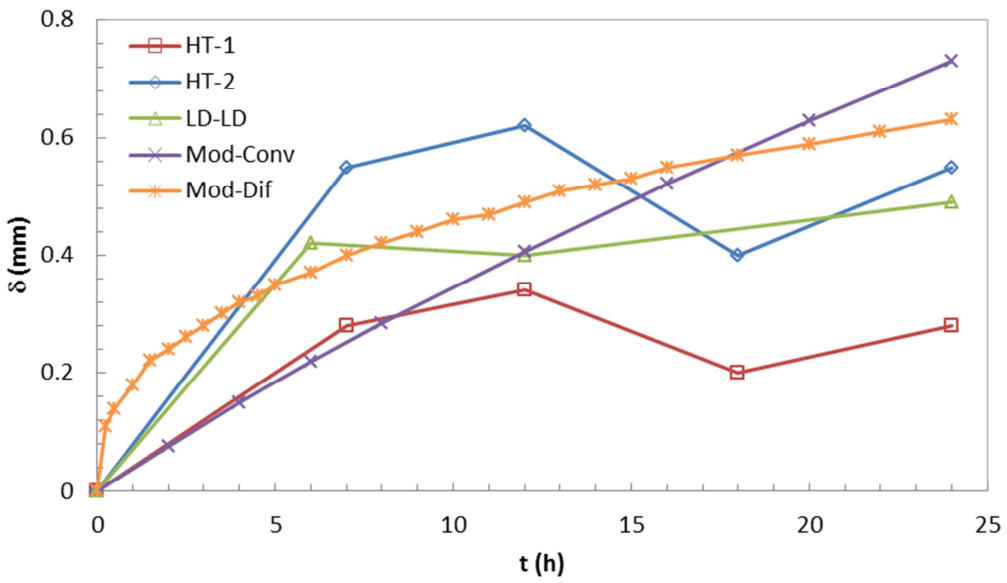


(a) Caso 1



(b) Caso 2

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA



(c) Caso 3

Figura 4.10: Espessura do depósito na extremidade do duto. Casos 1, 2 e 3.

Analisando os resultados obtidos para os três casos, observa-se que os resultados do presente trabalho (Mod-Conv) estão ajustados dentro dos contornos estabelecidos pelos métodos HT-1 e HT-2 de Matzain e apresentam valores razoáveis quando comparado com o método experimental LD-LD. O resultado obtido com o modelo difusivo acompanha de perto o resultado do modelo de Matzain, uma vez que os dois são modelos difusivos e com os mesmos ajustes empíricos. Destaque-se que, ao contrário das propostas de Matzain (1999) e Cruz (2011), não há nenhum fator de ajuste no presente modelo para o cálculo da taxa de deposição da parafina.

O Caso 3 apresenta certo ruído experimental, que não foi captado pelos modelos.

Observa-se que a taxa de crescimento obtida com o modelo difusivo no início do resfriamento é mais acentuada do que a do modelo convectivo, e apresenta uma redução substancial na taxa de crescimento, de forma análoga aos dados experimentais, a medida que o tempo passa. O modelo convectivo apresenta aproximadamente a mesma taxa de crescimento de depósito durante o período de 24 horas.

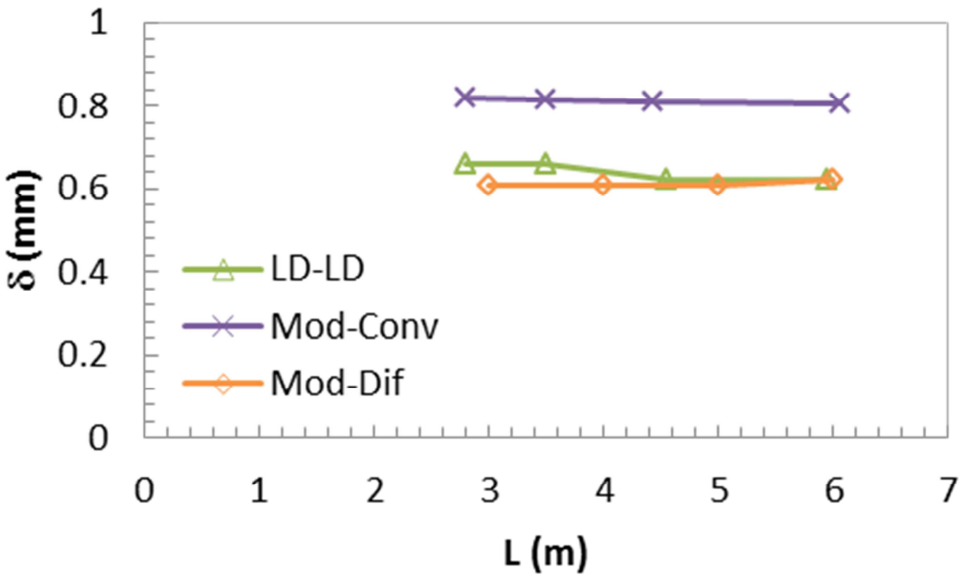
A Fig. 4.11 apresenta o resultado obtido para o perfil de depósito ao longo dos 7 metros do duto após 24 horas, para os três casos. Matzain (LD-LD) não conseguiu medir a espessura do depósito nos comprimentos iniciais do duto, por

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

isso a comparação foi realizada a partir de 2,5m, aproximadamente. A espessura do depósito é constante ao longo do canal, o que foi captado por ambos os modelos (difusivo e convectivo). Porém, os valores obtidos pelo presente modelo, nos três casos, são aproximadamente 30% superiores à aqueles obtidos pelos modelos difusivos de Matzain (1999) e Cruz (2011).

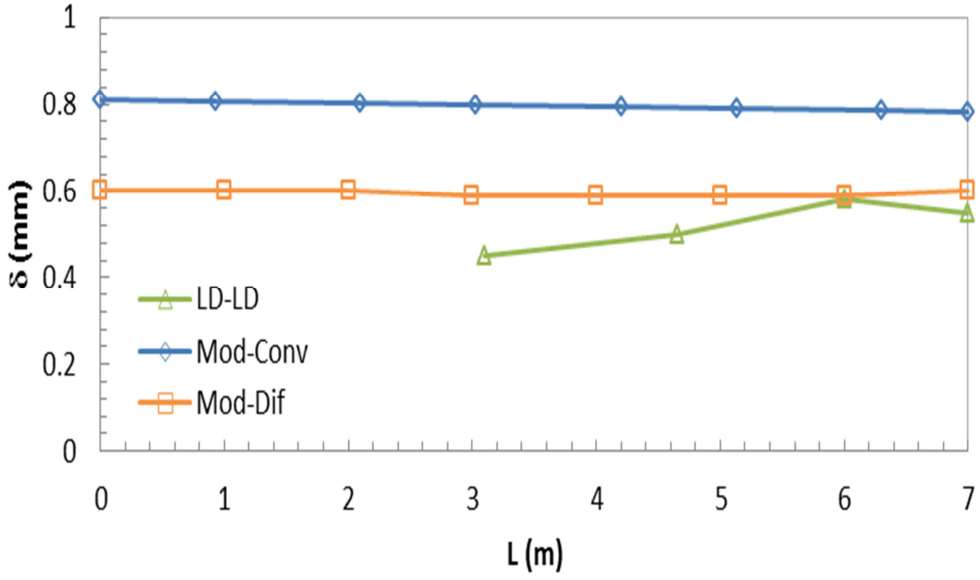
Os três casos testados utilizaram a mesma velocidade superficial do líquido, com crescente velocidade superficial do gás. Nota-se que o aumento da velocidade superficial de gás não causa redução significativa na espessura do depósito. Este comportamento era esperado visto que o coeficiente interno de troca de calor é governado pelo líquido, mantendo a temperatura na parede praticamente a mesma e, consequentemente, pouco influenciando no depósito de parafina.

Os casos 4 e 5 também correspondem a escoamento horizontal, porém com padrão estratificado e anular, respectivamente. Para estes dois casos, o padrão de escoamento previsto pelo presente modelo não concordou como observado por Matzain (1999). No entanto a distribuição temporal e espacial do depósito para os dois casos obtidas neste trabalho são similares as apresentadas por Matzain.

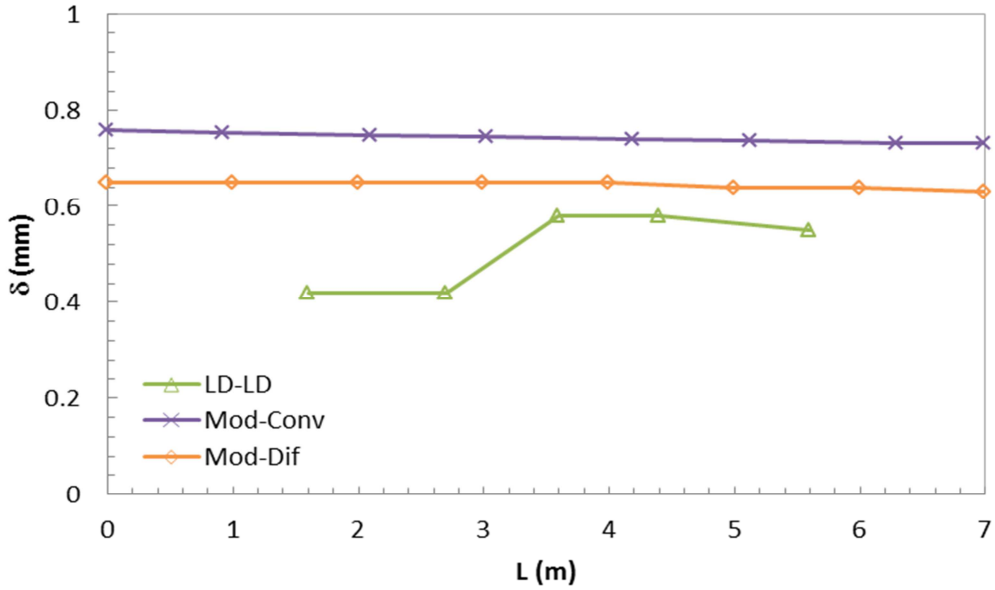


(a) Caso 1

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA



(b) Caso 2



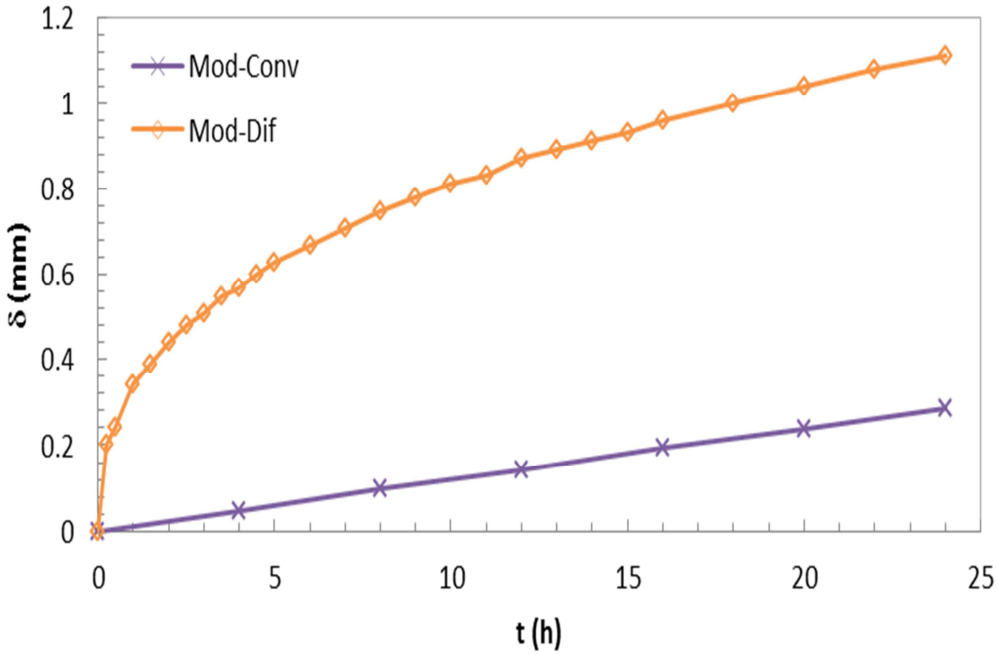
(c) Caso 3

Figura 4.11: Perfil de espessura do depósito ao longo do duto. Casos 1, 2 e 3.

A Fig. 4.12a corresponde ao caso 4, escoamento estratificado. Neste caso, Matzain não determinou a espessura do depósito, apenas foi verificado que, para este padrão (estratificado), o depósito se concentra na geratriz inferior do duto. Ao final de 24 horas a espessura do depósito no final do tubo media 2,0 mm na geratriz inferior e diminuía a zero a medida que se atingia a parte superior da seção do duto, atingindo o valor de 0,6 mm na altura da linha de centro.

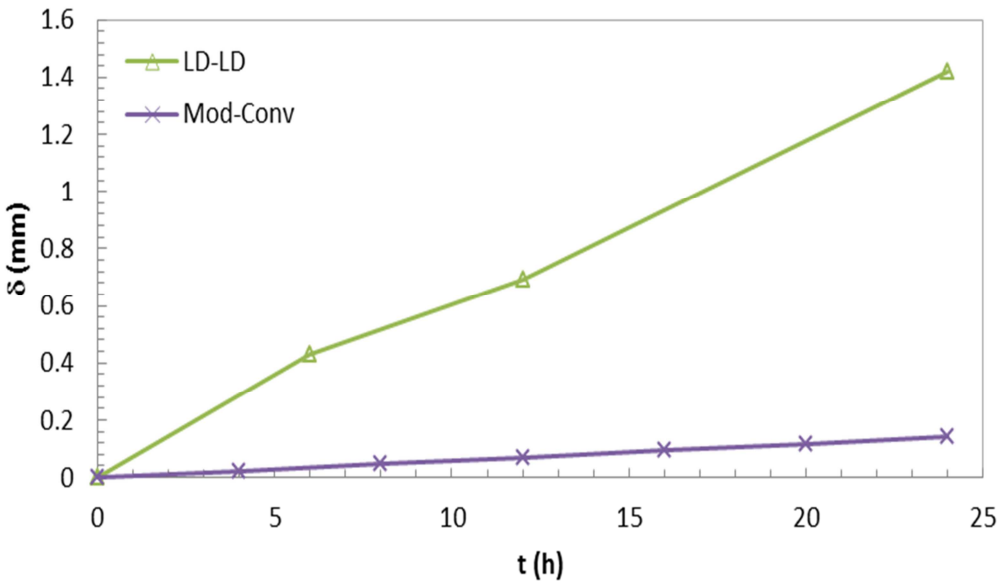
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

Os resultados obtidos para o caso 4 diferem significativamente daqueles obtidos pela metodologia de Cruz (2011), a qual apresenta valores bem superiores aos calculados pelo presente método. Matzain (1999) apresenta uma estimativa da espessura de depósito na saída do canal, como sendo aproximadamente igual a 0,70 mm, um pouco inferior a espessura obtida pelo modelo difusivo de Cruz (2011), a qual foi igual a 1,1 mm. A espessura obtida com o modelo convectivo foi de apenas 0,3 mm. Para comparar a espessura do depósito neste caso, é preciso considerar que pelo atual modelo, o depósito se distribui ao longo de toda a periferia do duto, enquanto que se observou experimentalmente que no caso de padrão estratificado, o depósito se concentra na parte inferior do duto. Se a espessura da parafina for concentrada na parte inferior do duto, a espessura resultante seria aproximadamente o dobro, i.e., 0,6 mm, se aproximando bastante do valor observado por Matzain.



(a) Caso 4 - estratificado

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA



(b) Caso 5 - anular

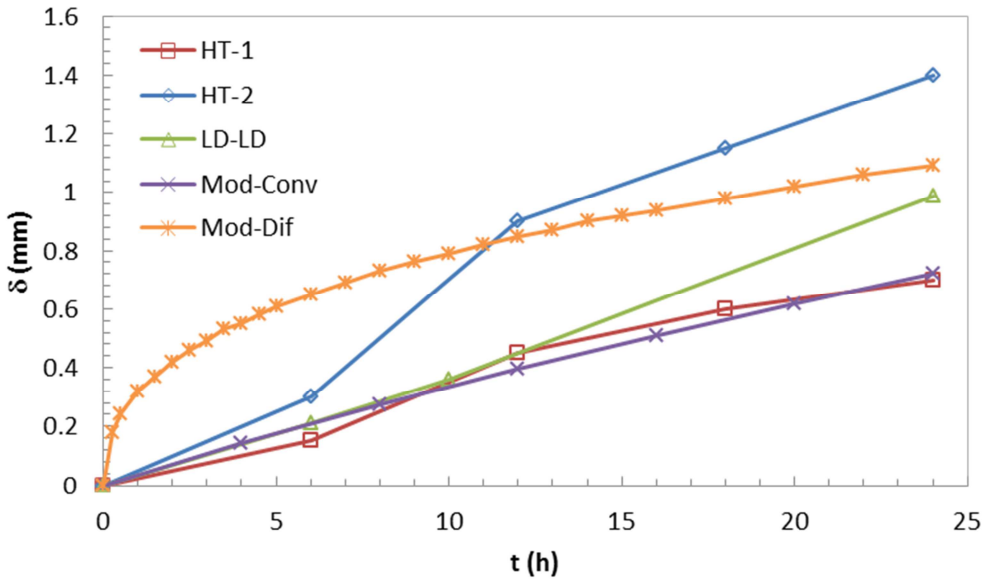
Figura 4.12: Espessura do depósito na extremidade do duto. Casos 4 e 5.

A variação temporal da espessura do depósito para o caso 5 é apresentada na Fig. 4.12b, que apresenta somente os dados do presente modelo e de Matzain. Grande divergência entre os resultados pode ser observada. A metodologia LD-LD apresenta valores bem superiores daqueles calculados pelo presente método. O ajuste para este padrão de fluxo não deve estar adequado visto que pelo mapa de fluxo do simulador TRANSFLUX, esta condição atinge o padrão "névoa" que é caracterizada por altas velocidades de gás e menor quantidade de líquido disperso no centro, quando comparado com o padrão anular obtido por Matzain.

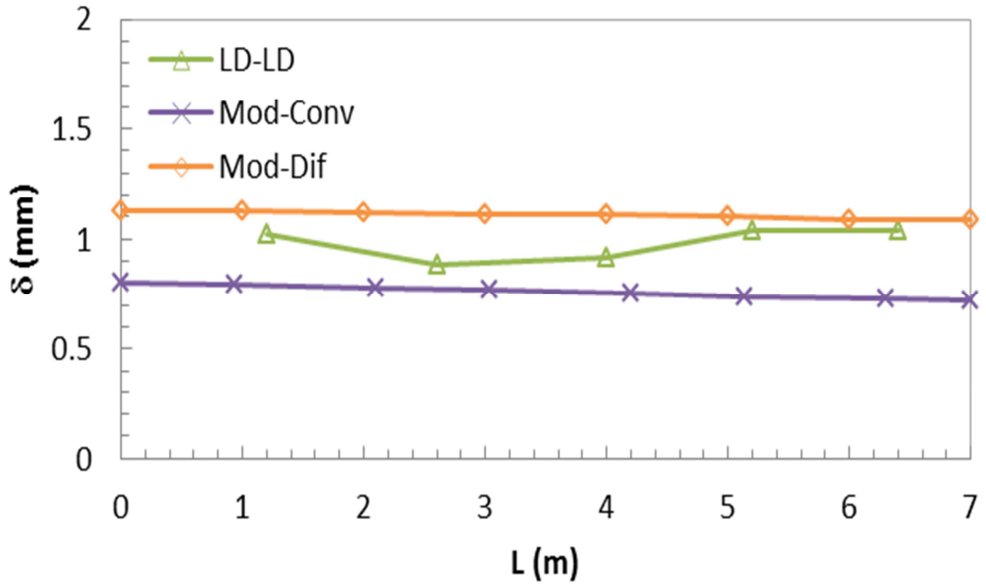
4.6.2
Escoamento Levemente Inclinado (2°) - Padrão de Fluxo Intermitente

O Caso 6 refere-se à condição de escoamento levemente inclinado com a horizontal (2°) com padrão de fluxo intermitente (Tabela 4.5). A Figura 4.13a apresenta a variação temporal do depósito na extremidade do duto, enquanto a Fig. 4.13b, apresenta a distribuição espacial do depósito.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA



(a) Espessura do depósito na extremidade do duto



(b) Perfil de espessura do depósito ao longo do duto

Figura 4.13: Caso 6 Escoamento Levemente Inclinado (2°)

Pode-se observar na Fig. 4.13a, que com a ligeira inclinação do tubo, o modelo convectivo prevê a espessura do depósito com crescimento praticamente linear com o tempo, apresentando resultados bem próximos daqueles obtidos pelos métodos LD-LD e HT-1, com melhor concordância com os dados experimentais que o modelo difusivo. Nota-se na Fig. 4.13b que a distribuição do depósito ao longo do tubo, continua sendo aproximadamente constante. A espessura calculada pelo modelo convectivo apresenta resultados ligeiramente inferiores à aqueles calculados pelo método de Matzain, LD-LD. Neste caso, o

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

modelo difusivo apresentou resultados superiores ao modelo convectivo, sendo a diferença entre os modelos de aproximadamente 30%.

Vale observar mais uma vez, que nenhum fator de ajuste foi introduzido no modelo convectivo, como nos modelos difusivos. Este fato é importante de ser mencionado, pois os fatores de ajuste dos modelos difusivos foram selecionados para aproximar a previsão dos modelos com os dados experimentais.

4.6.3
Escoamento Vertical

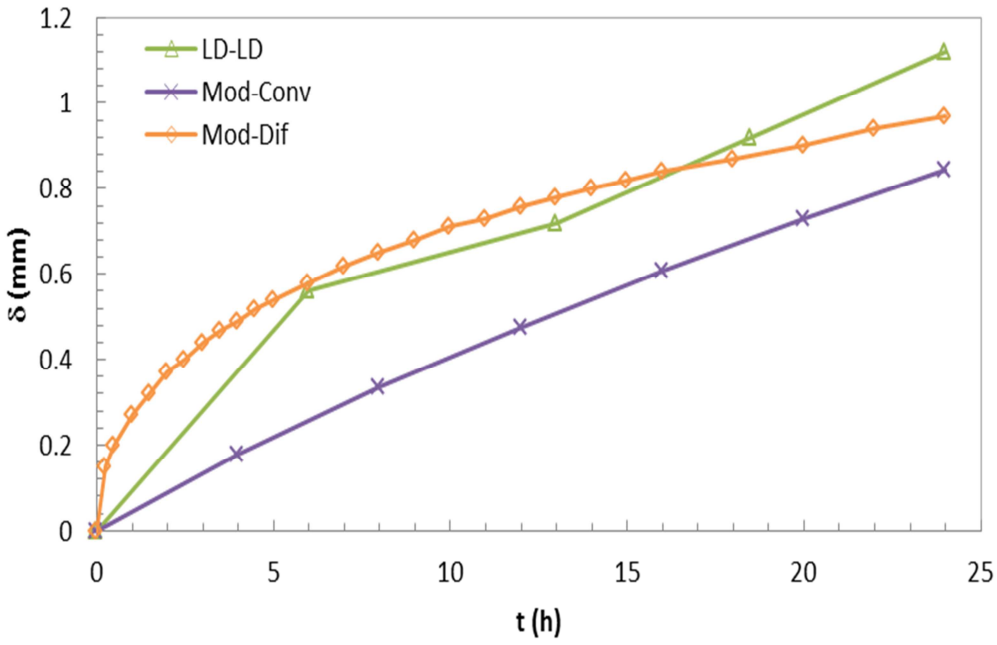
Os Casos 7, 8 e 9 correspondem a escoamento em tubulação vertical, porém cada caso apresenta um padrão de escoamento diferente. De acordo com a observação experimental de Matzain (1999), o primeiro é intermitente, o segundo de bolhas dispersas e o terceiro anular. Como mencionado, o modelo numérico utilizado conseguiu prever corretamente o padrão de escoamento dos casos 7 e 8, mas não o do caso 9.

A Figura 4.14 apresenta a distribuição temporal do depósito na última seção do duto (L=7m), observadas ao longo de 24 horas para os três casos, comparando os modelos difusivos de Matzain (1999) e Cruz (2011) com os resultados do modelo convectivo desenvolvido neste trabalho.

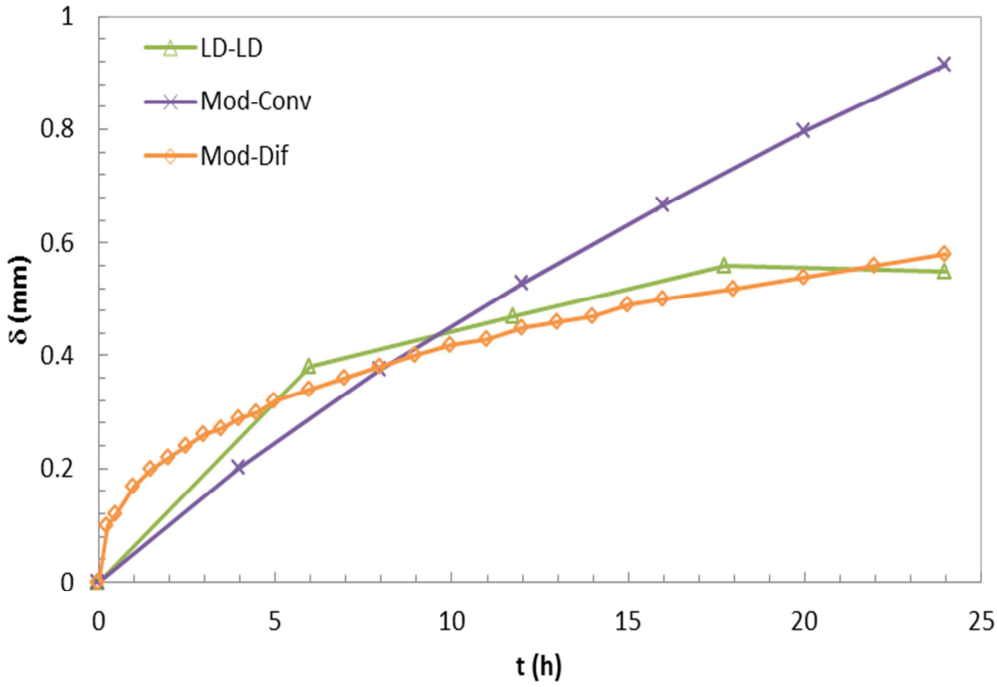
Observa-se que independentemente do padrão de escoamento, o modelo convectivo prevê um crescimento linear do depósito com o tempo, de forma similar ao obtido por Matzain, para os casos 7 e 9, porém em um patamar inferior. O mesmo crescimento linear não foi observado por Matzain para o caso 8, de bolhas dispersas. O modelo difusivo de Cruz (2011) se aproxima bastante dos dados de Matzain, para os casos 7 e 8, como é de se esperar, já que os dois utilizam aproximações análogas para obter a espessura do depósito. Cruz (2011) não apresentou resultados para o caso 9.

Embora o ajuste para este padrão de fluxo não tenha atingido a mesma condição observada no experimento de Matzain (golfada para a simulação e anular no experimento), o comportamento do depósito obtido pelo presente método é similar àquele obtido pelo método LD-LD.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

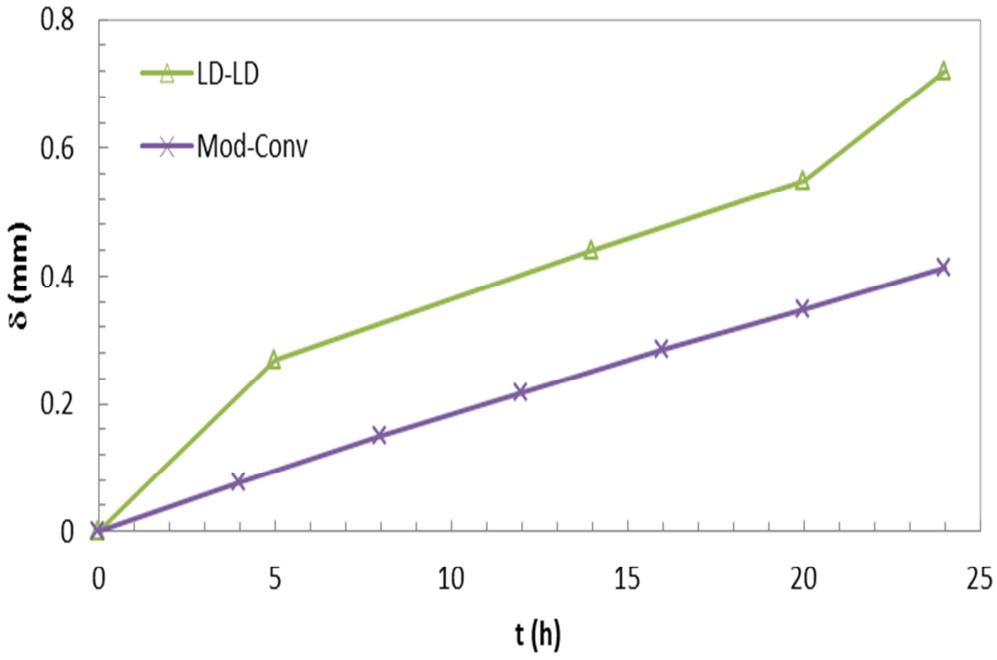


(a) Caso 7 – intermitente



(b) Caso 8 – bolhas dispersas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

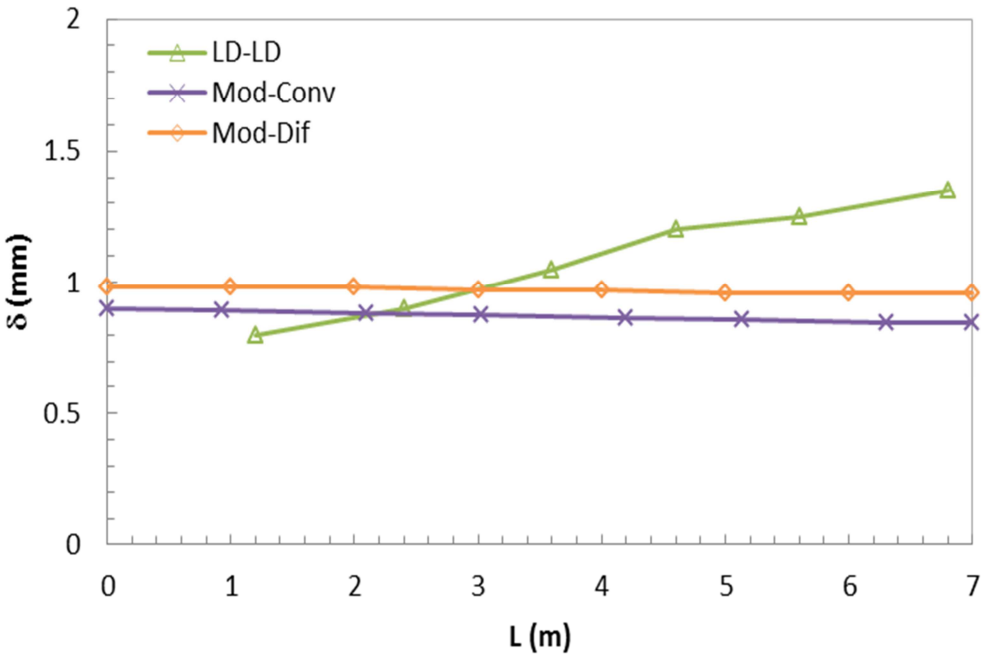


(c) Caso 9 - anular

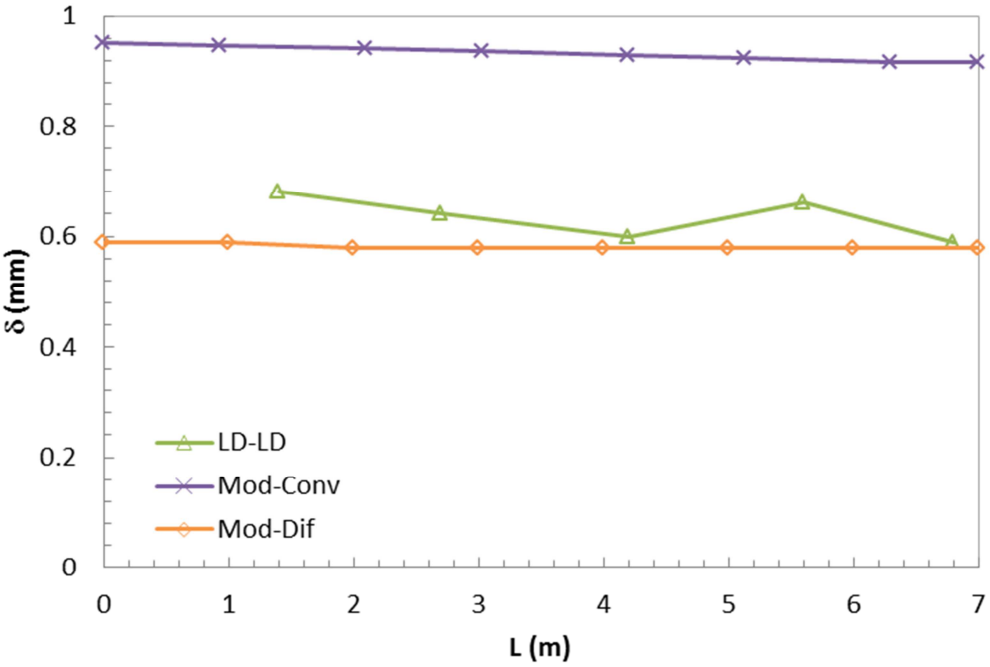
Figura 4.14: Espessura do depósito na extremidade do duto. Casos 7, 8 e 9.

A distribuição espacial do depósito é ilustrada na Fig. 4.15 para os três casos. Para escoamento vertical, Matzain apresenta um crescimento do depósito ao longo do duto. No entanto, ambos os modelos difusivo de Cruz (2011) como o presente modelo convectivo apresentaram distribuição aproximadamente uniforme ao longo do canal. Para o caso de padrão intermitente, os três modelos apresentam aproximadamente a mesma espessura de depósito. Já para o escoamento no padrão de bolhas, a espessura do depósito foi bem maior com o modelo convectivo, com o comportamento inverso no caso do padrão anular (caso 9).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

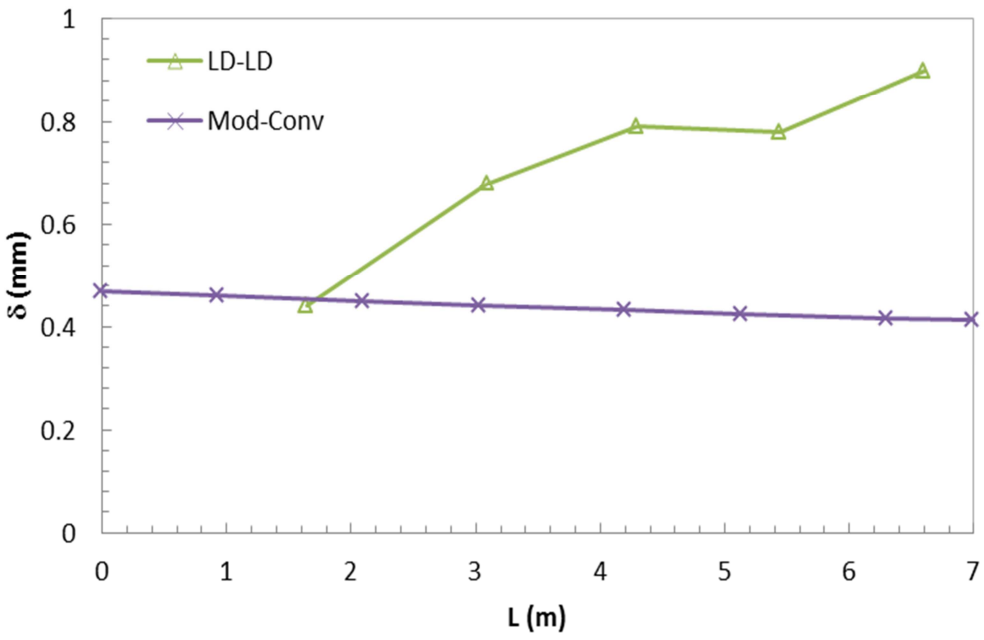


(a) Caso 7 – intermitente



(b) Caso 8 – bolhas dispersas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA



c) Caso 9 - anular

Figura 4.15: Perfil de espessura do depósito ao longo do duto. Casos 7, 8 e 9.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

4.7
Análise de Sensibilidade aos Parâmetros de Ajuste de Matzain

Os casos analisados anteriormente apresentam um ajuste razoável com os dados experimentais, embora alguns tenham apresentado pequenas discordâncias.

Nos estudos de Matzain (1999), foi sugerida a inclusão de coeficientes que pudessem corrigir eventuais aumentos no depósito de parafina devido a outros mecanismos distintos do mecanismo de difusão, e também que pudessem corrigir eventuais remoções do depósito devido aos efeitos de cisalhamento. Conforme sugestão, estes coeficientes foram inseridos na Eq 2.37 de variação de área do depósito chegando-se ao seguinte formato:

$$\frac{dA_d}{dt} = \frac{\rho_o}{\rho_{wax}} \frac{C_1}{(1+\pi_2)} \frac{h_m}{(1-\phi)} S_w dx(C - C_s) \tag{4.8}$$

onde A_d corresponde à área da seção transversal do depósito, ρ_o a massa específica do óleo, h_m o coeficiente de transferência de massa, ρ_{wax} é a massa específica da parafina sólida, ϕ é a porosidade, C é a concentração de parafina, C_s é a concentração de parafina na parede e S_w é o perímetro do depósito. Além disso, C_1 e π_2 são coeficientes propostos para correção de afastamento da taxa de deposição

devido a existência de outros mecanismos e devidos ao efeito de cisalhamento, respectivamente**.**

$$\pi_2 = C_2 \, \mathbf{Re}_{\delta}^{C_3} \tag{4.9}$$

onde Re_{δ} é número de Reynolds baseado na espessura de deposição.

A proposta deste trabalho não inclui a introdução desses parâmetros. Ou seja, aqui $C_1 = 1$ e $\pi_2 = 0$.

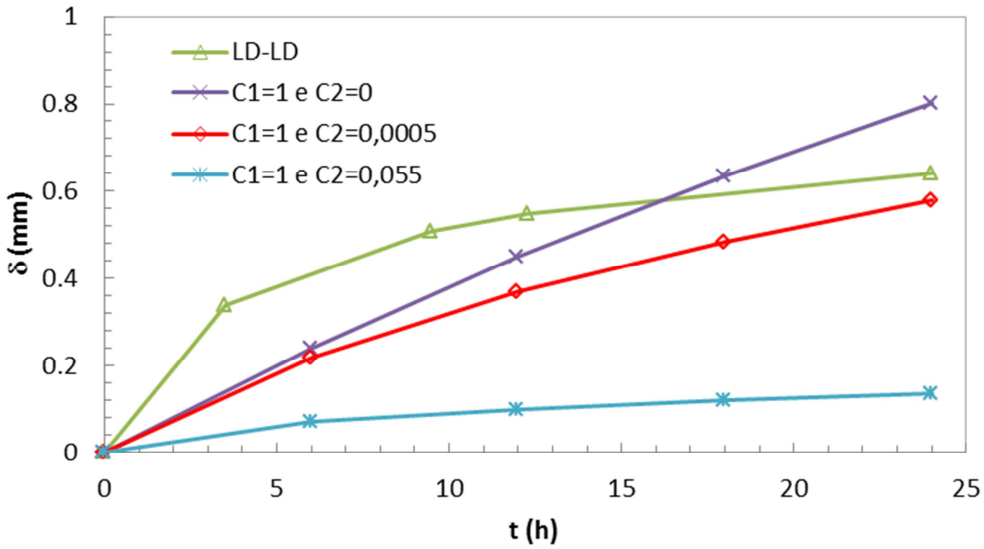
Portanto será realizada uma verificação da influência destes parâmetros nos resultados do presente modelo.

Foram selecionados os Casos 1, 3 e 8 para realização da análise de sensibilidade aos parâmetros de ajuste de Matzain (1999), por apresentarem um melhor ajuste do comportamento do depósito com os dados apresentados nos experimentos quando se introduz as variáveis C_1 e C_2.

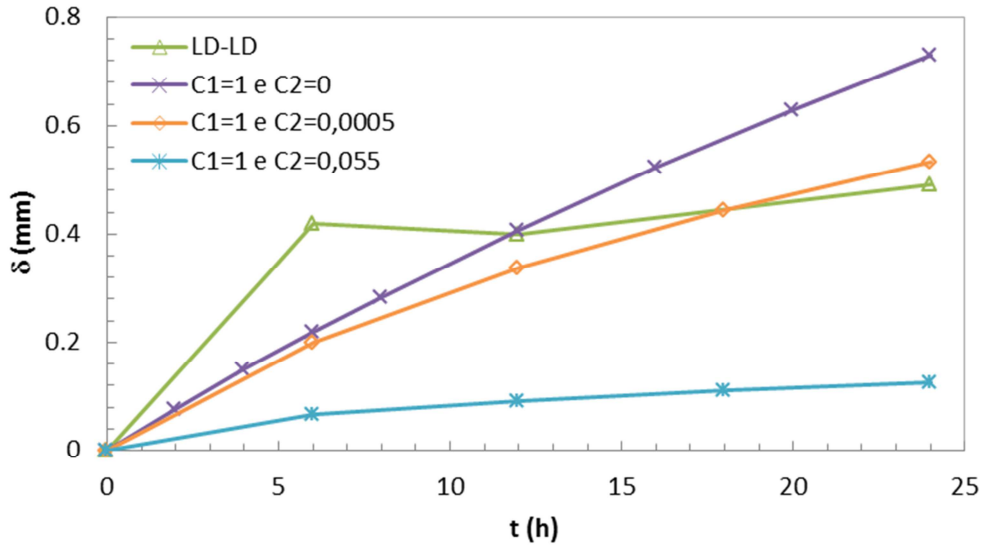
A introdução destes coeficientes pode melhorar o ajuste do modelo principalmente nos casos onde forças de cisalhamento estão presentes, assim como a correção no mecanismo de difusão de forma a considerar outros mecanismos.

A influência dos coeficientes C_1 e C_2 na espessura de depósito, para os casos de escoamento horizontal intermitente (Casos 1 e 3) e vertical com bolhas (Caso 8), é apresentada nas Fig. 4.16 a 4.18. Para o coeficiente C_1 utilizou-se os valores 1 (sem ajuste) e 15 (recomendado por Matzain). Já para o coeficiente C_2 utilizou-se além do valor 0 (sem ajuste) e diversos três valores (0,0005; 0,055; 0,015 e 0,030), sendo o primeiro abaixo do recomendado por Matzain (0,055) e os 2 últimos acima.

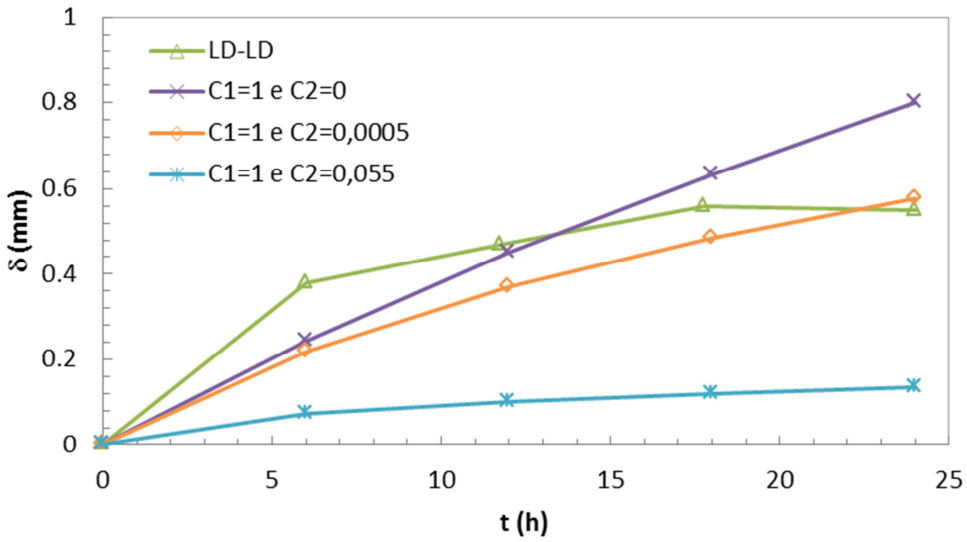
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA



(a) Caso 1 – horizontal intermitente



(b) Caso 3 – horizontal intermitente

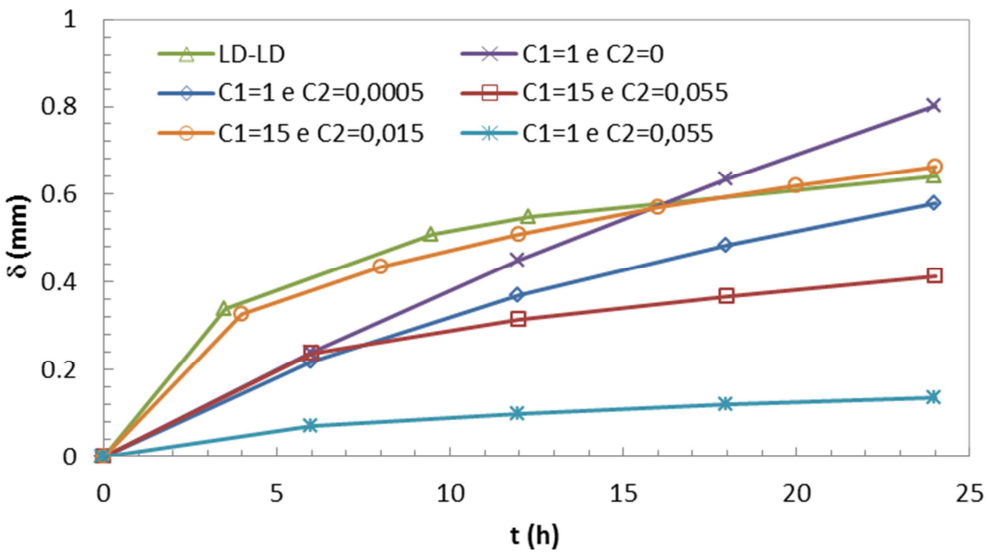


(c) Caso 8 – vertical bolhas

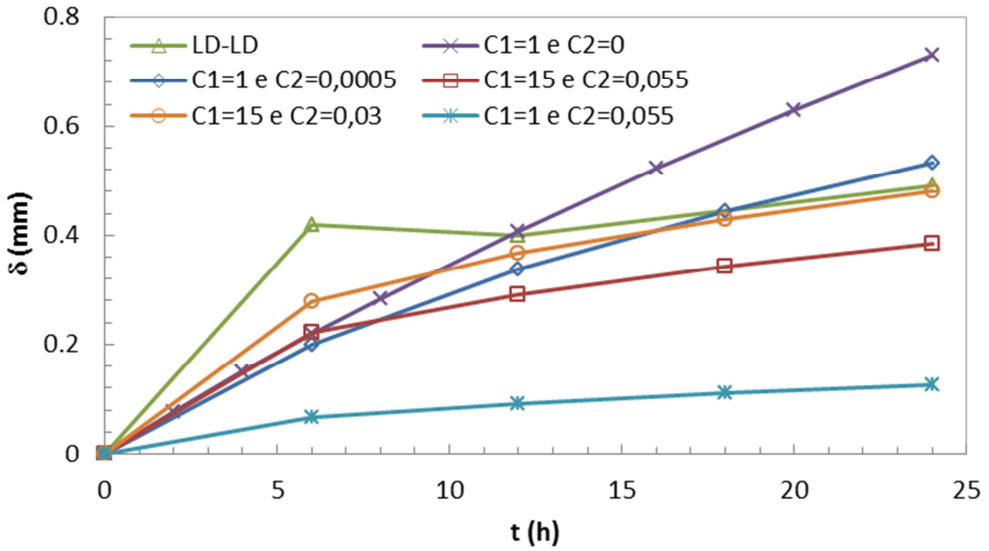
Figura 4.16: Influência de C_2. na espessura de depósito na extremidade final do duto.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

Primeiro analisou-se a influência do parâmetro C_2, que de acordo com Matzain, reduz a espessura do depósito, pois representa os efeitos de cisalhamento. Pode-se observar na Figura 4.16, correspondente a evolução temporal da espessura do depósito na saída da seção de teste, para todos os casos, que realmente, este parâmetro diminui a espessura do depósito, assintotizando a espessura do mesmo a medida que o tempo evolui. Nota-se, no entanto, que a utilização do valor recomendado por Matzain (C_2=0,05) induz a uma redução grande demais do depósito. Para a ordem de grandeza da espessura obtida com o modelo convectivo ser igual aos dados de Matzain, o parâmetro C_2 deve ser 100 vezes menor.

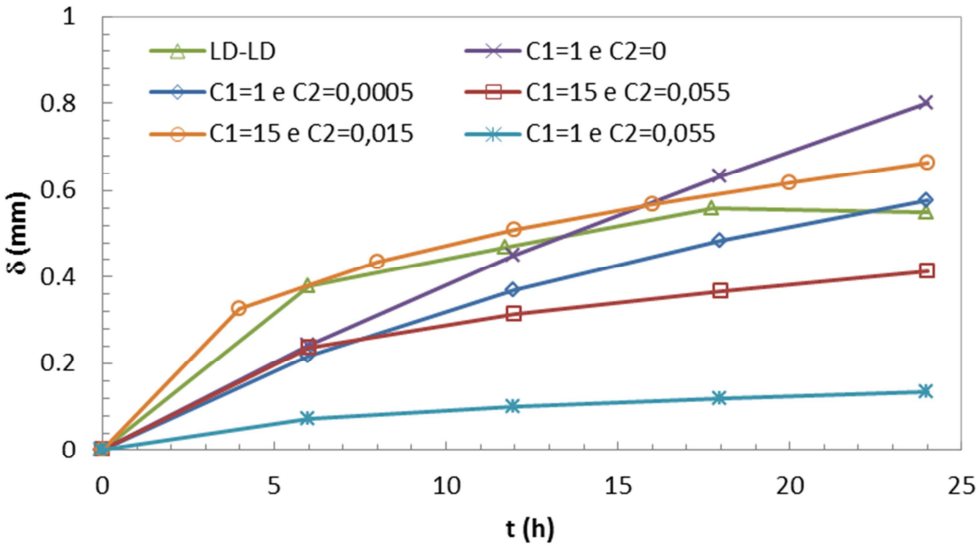


(a) Caso 1 – horizontal intermitente



(b) Caso 3 – horizontal intermitente

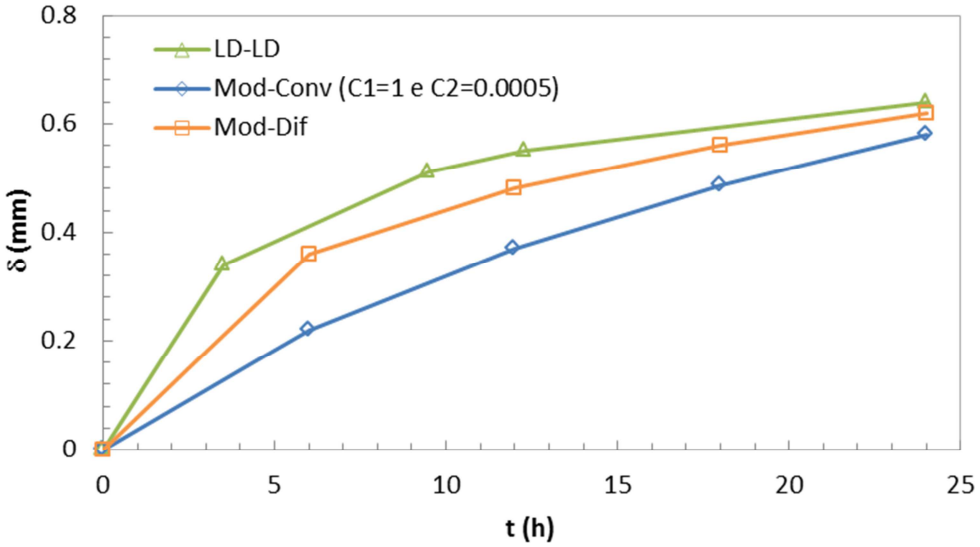
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA



(c) Caso 8 – vertical bolhas

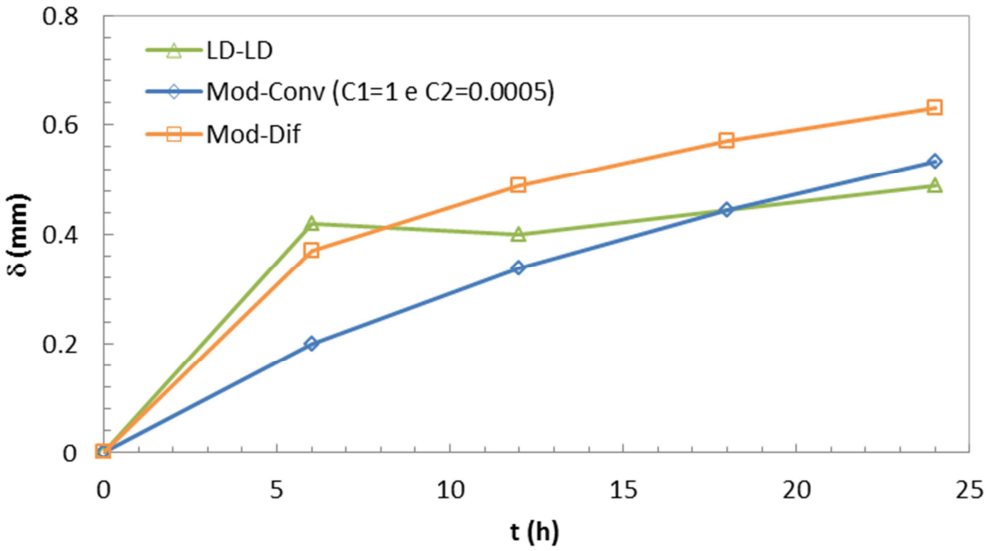
Figura 4.17: Influência de C_1 e C_2 na espessura do depósito na extremidade final do duto.

O efeito na evolução temporal do depósito da combinação das duas constantes empírica C_1 e C_2 pode ser visualizado na Fig. 4.17. O efeito do coeficiente C_1 é assintotisar a espessura do depósito. Porém, como o coeficiente C_1 aumenta significativamente a espessura do depósito, um valor mais elevado de C_2 deve ser utilizado para obter o nível desejado. A combinação C_1=15 e C_2=0,015 resulta em um perfil quase coincidente com o perfil de Matzain para os casos 1 e 8. Já para o caso 3, foi necessário utilizar um valor mais elevado de C_2 (0,030).

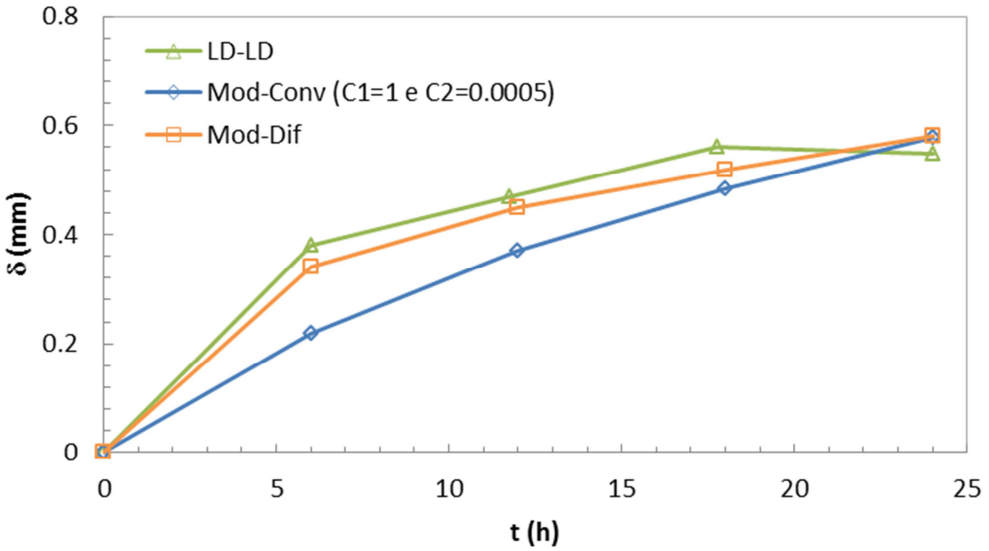


(a) Caso 1 – horizontal intermitente

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA



(b) Caso 3 – horizontal intermitente



(c) Caso 8 – vertical, bolhas

Figura 4.18 - Espessura de depósito na extremidade final comparando os métodos LD-LD e modelo difusivo com o modelo convectivo ajustado

A partir da análise realizada, conclui-se que o parâmetro C_1 não deve ser utilizado no modelo convectivo, pois o mesmo consegue prever com boa aproximação a taxa de depósito de parafina. Porém, a utilização do coeficiente C_2 que tem a finalidade de reduzir a espessura do depósito a medida que o tempo passa, representado os efeitos de cisalhamento, pode ser convenientemente utilizada.

Na Fig. 4.18 comparam-se os modelos difusivos de Matzain (1999) e Cruz (2011) com os resultados do modelo convectivo, usando C_1=1, e C_2 = 0,0005. Note que o modelo convectivo apresenta boa concordância com os dados de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA

Matzain para um pequeno valor do coeficiente C_2, ou seja, considerando levemente o efeito de cisalhamento no depósito de parafina.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1021749/CA