

## **2. Revisão Bibliográfica**

Muitas pesquisas foram realizadas na tentativa de entender e resolver o problema de deposição de parafinas nas linhas de transporte de óleo. Diferentes trabalhos de modelagem numérica e experimental foram desenvolvidos com a finalidade de prever o fenômeno de deposição de parafina. A seguir são apresentadas as conclusões de algumas das pesquisas mais relacionadas ao presente trabalho, direcionando o foco do estudo para a relevância dos mecanismos de deposição. Primeiramente, é feita uma breve descrição da parafina, suas características e os mecanismos considerados como responsáveis pelo fenômeno de deposição.

### **2.1. Características da Parafina**

O petróleo é uma mistura formada principalmente de hidrocarbonetos pesados os quais se encontram em proporções diversas. Estes hidrocarbonetos podem incluir proporções variáveis de parafinas normais e ramificadas, cicloparafinas, naftenos e hidrocarbonetos aromáticos [3]. Além disto, podem estar presentes compostos polares (resinas) e asfaltenos [17]. Dentre estes componentes, as parafinas e os asfaltenos são os componentes mais pesados do petróleo possuindo cadeias de carbonos de  $C_{20}$  ou maiores. Uma característica importante no estudo das parafinas é a sua solubilidade no petróleo. A solubilidade é uma propriedade que define as condições de temperatura e pressão nas quais estes compostos precipitarão da solução na forma de cristais. Estudos feitos revelam que a solubilidade das parafinas depende fortemente da temperatura, e decresce com a diminuição da mesma [20]. A pressão pelo contrário, parece não afetar significativamente a solubilidade.

As condições de elevada temperatura e pressão nas quais o petróleo é encontrado nos reservatórios garantem a solubilidade das parafinas. O óleo

retirado do reservatório normalmente entra nas linhas com temperaturas superiores a 40°C, sendo transportado através do ambiente frio que prevalece nas operações em águas profundas, onde a temperatura do mar encontra-se a aproximadamente 5°C. A troca de calor entre o escoamento e a água do mar resfria o petróleo, podendo atingir uma temperatura crítica conhecida como temperatura inicial de aparecimento de cristais (TIAC), na qual os primeiros cristais de parafina precipitam da solução. As pesquisas revelam que as parafinas de maior peso molecular precipitam primeiro formando cristais estáveis que entrelaçam-se para formar uma matriz sólida nas paredes das linhas [30].

As parafinas formam predominantemente o material depositado nas paredes dos dutos. Outros compostos, principalmente asfaltenos e resinas, também são encontrados em menor quantidade. A concentração de resinas e asfaltenos no óleo, afeta diretamente a solubilidade das parafinas. Em condições de baixo conteúdo de impurezas e baixas taxas de resfriamento, as parafinas precipitam na forma de cristais ortorrômnicos. No entanto, condições desfavoráveis, como alto conteúdo de impurezas, causam a precipitação de cristais hexagonais ou amorfos [20]. É importante ressaltar que a morfologia dos cristais formados depende fortemente das taxas de resfriamento e cisalhamento a que é submetido o escoamento.

## **2.2.**

### **Temperatura inicial de aparecimento de cristais (TIAC)**

A temperatura inicial de aparecimento de cristais (TIAC) ou ponto de névoa é definida como a temperatura em que os primeiros cristais parafínicos surgem à pressão atmosférica. Nesta temperatura as cadeias mais pesadas de parafina precipitam-se primeiro. Com a continuidade do resfriamento outras espécies de menor peso molecular também se precipitam.

A temperatura inicial de aparecimento de cristais varia com a composição do óleo. Estudos experimentais indicam que a TIAC não é necessariamente um valor fixo, podendo ser uma função da taxa de resfriamento. Seu valor pode depender também fortemente do método experimental usado para medi-la. Foi comprovado que a TIAC medida por microscopia pode ser de 10 a 20°C superior

do que a obtida por outros métodos como viscosimetria e calorimetria diferencial [12]. A microscopia, a calorimetria diferencial e a viscosimetria são os métodos mais conhecidos, embora seus resultados possam ser bastante díspares.

A microscopia é comumente usada como um método de referência para a observação e medição de crescimento de cristais. Amostras do petróleo são observadas em microscópio ótico enquanto são resfriadas a uma taxa controlada. A temperatura onde surgem os primeiros cristais é tomada como sendo o valor da TIAC [21]. Esta é considerada a metodologia mais indicada para a determinação da TIAC, embora possa requerer ensaios de longa duração.

A calorimetria diferencial conhecida como DSC, é uma técnica usada para a observação de mudança de fases sólido-líquido. Dois aquecedores independentes permitem o aquecimento ou resfriamento com taxas controladas da amostra a ser ensaiada, juntamente com uma amostra de referência. O instrumento detecta a diferença de temperatura entre a amostra e a referência durante o aquecimento ou resfriamento, armazenando a quantidade de calor fornecido ou retirado [21]. Este procedimento usa o monitoramento calorimétrico marcando um ponto base (calor sensível) e detectando um pico exotérmico devido ao aparecimento dos cristais (calor latente).

A técnica de determinação da TIAC por viscosimetria é baseada na mudança das propriedades reológicas do óleo causada pela precipitação de cristais de parafina. Ronningsen et al [25] observaram para os métodos de calorimetria diferencial e viscosimetria que uma quantidade de parafina suficiente deve cristalizar para que seus efeitos térmicos ou viscosos possam ser detectados, o que quer dizer que os pontos de névoa determinados por estes métodos resultam quase sempre abaixo do verdadeiro valor.

A Tabela 2.1 mostra uma reprodução parcial dos resultados obtidos da medição dos pontos de névoa para diferentes amostras de óleo pelos três métodos mencionados [25]. Estes dados mostram a discordância de resultados entre as diferentes técnicas mencionadas.

Tabela 2.1 - Comparação entre os diferentes métodos de determinação do ponto de névoa [25] - reprodução parcial.

Óleo	Ponto de Névoa (°C)		
	Microscopia	D.S.C.	Viscosimetria
1	30,5	11,0	23,0
2	38,5	17,0	28,0
3	41,0	33,5	35,0
4	48,0	32,5	31,0
5	39,5	39,5	40,0
6	39,0	39,5	39,0
7	34,5	32,0	28,0
8	38,0	32,0	31,0

### 2.3.

#### Mecanismos de deposição

A capacidade de previsão do fenômeno de deposição de parafina nas paredes dos dutos depende fundamentalmente do entendimento dos mecanismos físicos que governam a deposição. Um dos mais importantes e mais citados trabalhos que buscou identificar os mecanismos responsáveis pela deposição de parafina é aquele de Burger et al. [5]. Neste trabalho foram identificados os possíveis mecanismos de deposição como sendo a difusão molecular, a difusão Browniana, a dispersão por cisalhamento, e a deposição por efeitos gravitacionais. A seguir é apresentada uma descrição de cada um destes mecanismos, tal com apresentada no referido trabalho de Burger [5].

#### 2.3.1.

##### Difusão molecular

A difusão molecular é considerada como um dos possíveis mecanismos de deposição de parafina na fase líquida. Quando o óleo escoando pelas linhas é resfriado, é gerado um gradiente de temperatura na direção radial da tubulação, sendo a região da parede, a mais fria. Devido ao fato da solubilidade da parafina decrescer com a temperatura, o gradiente de temperatura estabelecido, gera uma maior concentração de parafina dissolvida na região mais quente o que ocasiona um transporte por difusão molecular de parafina na fase líquida na direção da parede do duto. Burger et al. [5] representaram a

difusão molecular com a equação de difusão de Fick, onde o gradiente de concentração de parafina na parede é representado como o produto da derivada da concentração com relação à temperatura, pelo gradiente radial de temperatura. Assim,

$$\frac{dm_m}{dt} = \rho_w AD_m \frac{dC}{dT} \frac{dT}{dr} \quad (2.1)$$

onde  $dm_m/dt$  é a taxa de deposição de parafina por difusão molecular,  $\rho_w$  é a massa específica da parafina sólida,  $A$  é a área de deposição,  $D_m$  é o coeficiente de difusão da parafina líquida no óleo,  $dC/dT$  é o coeficiente de solubilidade da parafina no óleo e  $dT/dr$  é o gradiente radial de temperatura.

A difusão molecular é amplamente aceita pelos pesquisadores como o principal mecanismo de deposição de parafina. A grande maioria dos modelos numéricos de simulação do fenômeno de deposição foram desenvolvidos considerando deposição por difusão molecular como o único mecanismo atuante [4, 8, 28]. No entanto, conforme discutido em [1], acredita-se que não exista evidência experimental suficiente para confirmar esta dominância do mecanismo de difusão molecular para todas as condições de operação dos dutos.

### 2.3.2. Difusão Browniana

A difusão Browniana é um mecanismo que considera o transporte de partículas na fase sólida. Pequenas partículas de cristais formados suspensos em regiões do escoamento com temperatura abaixo da TIAC colidirão continuamente com moléculas termicamente agitadas de óleo, gerando movimentos randômicos dos cristais suspensos. No caso de existir gradiente de concentração de partículas, estas serão difundidas na direção de menor concentração. A expressão matemática utilizada para quantificar este fenômeno é similar à difusão molecular. A lei de Fick para a difusão Browniana é caracterizada por um coeficiente de difusão de partículas sólidas. Assim,

$$\frac{dm_B}{dt} = \rho_w AD_B \frac{dC}{dr} \quad (2.2)$$

onde  $dm_B/dt$  é a taxa de deposição de parafina por difusão Browniana,  $\rho_w$  é a massa específica da parafina sólida,  $A$  é a área de deposição,  $D_B$  é o coeficiente de difusão Browniana para os cristais de parafina no petróleo,  $C$  é a fração volumétrica da parafina sólida fora da solução e  $r$  é a coordenada radial. Como será visto mais a frente, vários modelos de predição da deposição disponíveis na literatura desprezam o mecanismo de difusão Browniana [4, 10, 11, 17, 28]. No entanto, acredita-se que esta conclusão não tem um suporte experimental suficiente.

Como foi dito, o gradiente de concentração de cristais suspensos é a força motora deste mecanismo. Um perfil de concentração esperado na seção transversal de um duto ocasionado pelo resfriamento da parede (fluxo de calor negativo), apresentaria uma maior concentração de cristais na região perto da parede semelhante àquele na Figura 2.1 [5]. Nesta figura, é apresentada a variação de concentração em volume da parafina sólida, em função da coordenada radial adimensional do duto ( $r/R$ ). O perfil de temperatura mostrado evidencia a menor temperatura da parede. Assim, devido ao gradiente de temperatura gerado e com a condição de contorno que impõe a concentração nula de cristais na parede, é produzido um pico no perfil de concentração na região próxima à parede. Observando o pico de concentração gerado, pode-se concluir que a difusão Browniana existirá em ambos sentidos, para a parede e na direção da linha de centro do duto. Assim, seguindo estas conclusões, pode ser dito que a difusão Browniana poderia ser responsável pelo transporte de partículas (cristais) para o depósito.

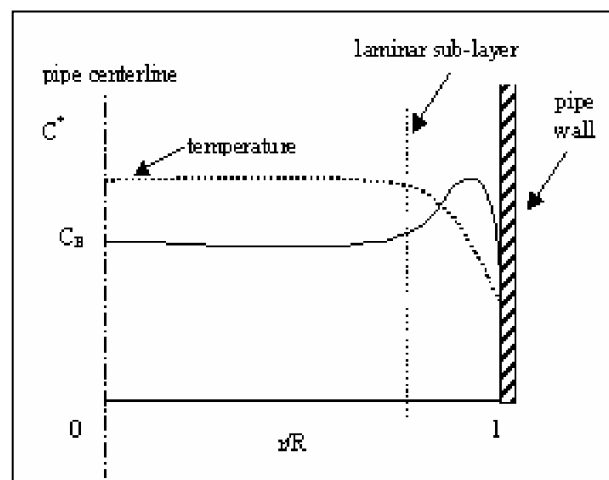


Figura 2.1: Perfil de concentração de cristais de parafina precipitados devido ao resfriamento da parede [5].

### 2.3.3. Dispersão por cisalhamento

A dispersão por cisalhamento é considerada como um possível mecanismo responsável pelo transporte de parafina precipitada (cristais). Partículas pequenas suspensas no escoamento sofrem, devido à viscosidade do fluido, um movimento rotacional. Em regiões suficientemente afastadas da parede do duto estas partículas tenderão a ser transportadas na mesma velocidade axial que a da linha de corrente que passa pelo seu centro, e com velocidade angular igual à metade da sua taxa de cisalhamento. Esta rotação por sua vez, induz um movimento circulatório em uma região adjacente à partícula. Para uma grande densidade de partículas suspensas acontecerá um número significativo de interações entre elas. Assim, estes movimentos poderiam desviar as partículas de sua trajetória original resultando em um transporte lateral das mesmas [5].

Burger et al. [5] definiram este mecanismo como responsável pelo transporte de cristais na direção da parede quando a quantidade de cristais precipitados em suspensão é grande. Por outro lado, diferentes pesquisas realizadas sobre a migração de partículas em suspensões concentradas, revelaram que o transporte lateral destas é na direção oposta da parede. Segre et al [26] na sua pesquisa utilizando partículas esféricas, afirmaram que estas migram para uma região anular de equilíbrio entre a parede e a linha central do duto. Já um trabalho mais recente realizado por Matas et al, [18], também para partículas esféricas rígidas, mostrou que o aumento do número de Reynolds muda a posição da região anular de equilíbrio na direção da parede. As Figuras 2.2 e 2.3 mostram seus resultados experimentais para  $Re=67$  e  $Re=350$  respectivamente. Em ambos dos casos, os eixos representam o raio interno adimensional da tubulação (parede em  $r=1$ ). Cada figura é acompanhada do histograma que mostra a probabilidade como função do radio adimensional.

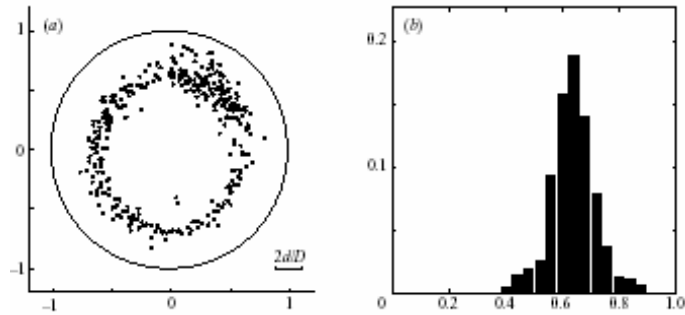


Figura 2.2: (a) Distribuição de partículas na seção transversal do duto com (b) o correspondente histograma de probabilidade, para  $Re=67$ .

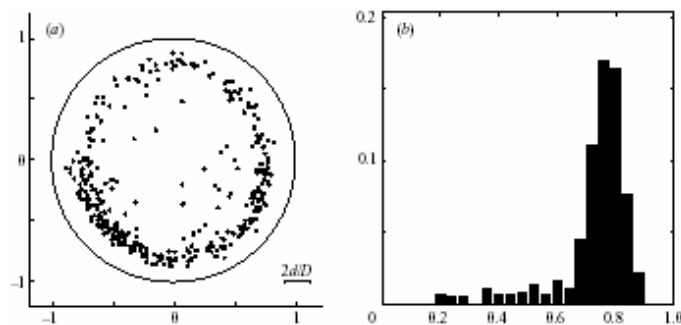


Figura 2.3: (a) Distribuição de partículas na seção transversal do duto com (b) o correspondente histograma de probabilidade, para  $Re=350$ .

Como também será visto mais a frente, Todi [29] estudou a distribuição da concentração de cristais com uma solução óleo-parafina escoando com temperatura abaixo da TIAC (cristais de parafina suspensos). Uma experiência com o fluido entrando na mesma temperatura da parede (fluxo de calor nulo), resultou em maiores concentrações de cristais em uma região anular próxima à linha de centro do duto. Nesta condição de fluxo de calor nulo, a ausência de fluxo de calor radial que conseqüentemente elimina o fluxo radial difusivo de parafina líquida, elimina a possibilidade da existência de um gradiente de concentração não sendo possíveis a deposição por difusão molecular e difusão Browniana. Assim, é dito que a dispersão por cisalhamento é o único mecanismo participante. Desta experiência Todi concluiu que a dispersão por cisalhamento transporta os cristais suspensos para uma região intermediária entre a parede e a linha central do duto (longe da parede). Um segundo experimento realizado por Todi desta vez com uma temperatura de parede menor (fluxo de calor negativo), não afetou significativamente a distribuição da concentração de cristais resultando um perfil de concentração similar ao obtido para fluxo nulo. Por outro lado, contrariamente ao dito por Matas et al [18], Todi



afirmou que o aumento do número de Reynolds muda a posição de equilíbrio da seção anular de maior concentração de cristais, na direção da linha central do duto.

As diferentes pesquisas mencionadas concordam em afirmar que o cisalhamento causa a migração das partículas para uma região anular entre a parede e a linha central do duto. No entanto, a discordância em relação à influência do número de Reynolds na posição final desta região, poderia ser ocasionada pelo fato de que os cristais de parafina diferem muito da morfologia das esferas rígidas. Como foi explicado, acredita-se que experiências em condições de fluxo de calor nulo poderiam servir para avaliar o transporte de cristais por dispersão por cisalhamento. No entanto, com os resultados observados que mostram que o cisalhamento gera concentrações de cristais em regiões anulares intermediárias, pode ser dito que a dispersão por cisalhamento pode facilitar condições para que a difusão Browniana aconteça. Assim, uma experiência na condição de fluxo de calor nulo poderia também servir para estudar a difusão Browniana (movimentação de cristais suspensos devido ao gradiente de concentração) além da dispersão por cisalhamento.

#### **2.3.4. Deposição por efeitos gravitacionais**

A deposição por gravidade foi também considerada como um possível mecanismo de deposição de cristais. Os cristais precipitados no escoamento são mais densos que o líquido circundante. Assim, esta diferença da massa específica poderia gerar a precipitação destes cristais na parte inferior das paredes da tubulação ou tanques de armazenamento. No entanto, testes feitos pelo método de centrifugação para amostras de óleo em experiências de longa duração determinaram que a deposição por gravidade não é um mecanismo relevante [5]. Um ponto de concordância entre os autores é precisamente que a deposição de parafinas por efeitos gravitacionais não é relevante em condições de escoamento. Recentemente, estudos detalhados realizados no Laboratório de Termociências da PUC-Rio mostraram, pela primeira vez, imagens do processo transiente da deposição de parafina em canais [14]. Neste trabalho foi mostrado que as espessuras de depósito nas paredes superior e inferior do

canal eram iguais, o que descarta os efeitos gravitacionais como mecanismo relevante de deposição.

## **2.4. Revisão da Literatura**

Após a apresentação dos principais fenômenos envolvidos na deposição de parafina em dutos, apresentam-se agora os trabalhos publicados na literatura considerados mais relevantes para o presente estudo.

As pesquisas realizadas com a finalidade de entender o fenômeno de deposição de parafinas ainda mostram algumas discordâncias principalmente no que se refere à relevância dos mecanismos de deposição de parafina. A difusão molecular, um mecanismo de transporte de parafina na fase líquida, é o mecanismo de deposição mais aceito, sendo considerado como predominante pela maioria dos autores. As maiores contradições surgem na literatura na definição dos mecanismos responsáveis pelo transporte de cristais sólidos suspensos no escoamento. Há contradições também quanto a atuação da tensão cisalhante imposta pelo escoamento sobre o depósito no que diz respeito à sua remoção.

A pesquisa bibliográfica apresentada a seguir procura mostrar as principais conclusões das referências mais citadas voltadas ao entendimento do transporte de cristais no escoamento. O transporte de cristais na fase sólida está diretamente relacionado com testes na presença de cristais em suspensão em condições onde não há troca de calor do fluido através da parede do duto (fluxo de calor nulo), e quando a parede encontra-se mais quente que o fluido (fluxo de calor positivo). Sob estas duas condições, não há possibilidade de deposição por difusão molecular que exige a presença de um fluxo de calor negativo, isto é, a parede do duto mais fria que o fluido. Assim, se houver deposição sob estas condições, o mecanismo deve necessariamente envolver o transporte de cristais em suspensão no escoamento. O presente trabalho tem seu foco exatamente no estudo da deposição de parafina na presença de cristais em suspensão no escoamento.

### **2.4.1. Hunt, 1962**

Hunt [11] realizou experiências de deposição de parafina para condições estáticas e com escoamento. O objetivo principal destas experiências foi estudar os efeitos dos revestimentos em dutos e dos aditivos químicos sobre a deposição de parafinas.

Experiências para medição das propriedades do depósito como sua dureza e aderência foram feitas usando como seção de testes uma placa fria. Além de medir as propriedades, esta experiência permitiu a medição de quantidades de parafina depositada para longos períodos de tempo (15 h). Foi observado, por exemplo, que o depósito não tinha aderência em aço inox polido, mas sim em uma superfície jateada com areia do mesmo material, do que foi concluído que o depósito não é preso numa superfície por forças de adesão, mas sim pela rugosidade da superfície.

Todos os experimentos realizados por Hunt foram para condições de escoamento em regime laminar. O estudo tentou simular a deposição de parafinas produzida na tubulação vertical de saída de um poço de petróleo. A seção experimental usada permitia submeter o escoamento a diferentes gradientes de temperatura. Das experiências realizadas, concluiu-se que o resfriamento é o fator necessário para a deposição de cristais. Outros estudos feitos para condições de temperatura constantes não resultaram deposição. Visualizações de manchas de parafina depositada na região de entrada da seção de testes no início do resfriamento levaram a concluir que a deposição de parafinas é iniciada por nucleação. Com o transcorrer do tempo estas manchas transformavam-se numa camada homogênea, propondo que o crescimento do depósito depois da nucleação era causado pela difusão molecular. Visualizações similares para pequenos e elevados gradientes de temperatura concluíram que o mecanismo de deposição não varia devido ao gradiente de temperatura imposto. Em consequência, ele não considera a deposição de partículas já precipitadas na sua teoria.

### 2.4.2. Burger et al., 1981

Problemas de deposição na Trans Alaska Pipeline System (TAP), mesmo para vazões elevadas, geraram a necessidade de um estudo mais profundo dos mecanismos que causam a deposição de parafinas e da natureza temporal e espacial do depósito. A pesquisa desenvolvida por Burger et al. [5] iniciou-se com testes em escala em laboratório simulando as condições similares de operação da TAP. Todas as experiências realizadas em condições de escoamento em regime laminar consideraram a taxa de cisalhamento como a variável mais importante, seguida do gradiente de temperatura imposto ao escoamento.

Experiências de deposição realizadas em laboratório em tubulações com disposições horizontais e verticais, não mostraram variação significativa sobre o depósito total resultante. Foi assim, que a deposição por gravidade foi desprezada em condições de escoamento. Burger et al [5] consideram a difusão molecular como o mecanismo de deposição mais importante, seguida da dispersão por cisalhamento e ainda a difusão Browniana em menor escala. Deste modo, as taxas de deposição foram modeladas como a somatória das taxas geradas por difusão molecular de parafina dissolvida, e pela ação combinada da dispersão por cisalhamento e difusão Browniana de cristais precipitados. A difusão molecular foi modelada pela lei de Fick (Eq. 2.1). Por outro lado, a taxa de incorporação de partículas sólidas (cristais),  $dm_i/dt$ , foi considerada proporcional, à fração de partículas sólidas na região da interface sólido-líquido,  $C_w^*$ , à taxa de cisalhamento na parede,  $\gamma$ , e à área superficial disponível,  $A$ . Assim,

$$\frac{dm_i}{dt} = k^* C_w^* \gamma A \quad (2.3)$$

onde  $k^*$  é uma constante de deposição. Esta equação representa o efeito combinado dos mecanismos de difusão Browniana e dispersão por cisalhamento em condições de elevadas concentrações de cristais suspensos, em que a taxa de incorporação de cristais ao depósito é menor que o fluxo de transporte lateral de cristais até a interface por ambos mecanismos. A forma desta equação

empírica indica que a taxa de deposição aumenta linearmente com o aumento da taxa de cisalhamento.

Os resultados experimentais obtidos dos testes realizados em laboratório mostraram que as taxas de deposição eram muito pequenas em testes com taxas de cisalhamento muito baixas. A Tabela 2.2 mostra as condições em que foram realizados os diferentes testes desenvolvidos em laboratório. Por outro lado, a Figura 2.4 mostra as taxas de deposição medidas nas experiências, comparadas com as previsões das equações propostas (Eq. 2.1 e 2.3). É claramente mostrado que a previsão por difusão molecular subestima as taxas de deposição medidas.

O mais importante na Figura 2.4, independentemente das conclusões obtidas pelos autores, é perceber que a taxa de deposição medida experimentalmente foi na maioria dos casos superior ao previsto por difusão molecular. Isto evidencia a presença de outros mecanismos de deposição de cristais.

Como foi dito, o comportamento da equação proposta para a taxa de incorporação de cristais contemplava o aumento linear da taxa de deposição com o incremento da taxa de cisalhamento. Esta conclusão é contraditória já que em testes adicionais para taxas de cisalhamento elevadas, foi observado que o depósito era reduzido evidenciando a presença do fenômeno de remoção de cristais por cisalhamento.

Tabela 2.2: Dados das condições em que foram realizadas as experiências em laboratório [5].

	Series Number*									
	V-1	H-1	H-2A	H-2B	H-2C	H-3	H-4	H-5	H-6	H-7
Tube ID, mm**	4.93	4.93	4.93	4.93	4.93	4.93	4.93	10.21	10.21	4.93
Number of Tests	7	10	5	5	5	6	5	5	6	5
Average Operating Conditions										
Inlet temperature, °C	12.8	14.9	14.5	9.4	5.4	17.1	11.8	14.3	13.9	13.8
Outlet temperature, °C	-4.3	-4.5	7.1	4.4	-4.3	-3.0	-6.3	-3.9	-3.9	13.6
Shear rate, seconds <sup>-1</sup>	10.3	10.7	10.7	10.7	10.7	3.5	31.0	7.2	2.4	12.1
Heat flux, kW/m <sup>2</sup>	0.0748	0.0880	0.0331	0.0227	0.0451	0.0303	0.232	0.248	0.0820	0.0009
Measured Deposit, g/D										
Waxy crystal content	0.161	0.0753	0.0592	0.127	0.0918	†	0.301	0.350	†	0.0159
Total immobile layer	1.13	0.945	1.85	0.552	1.00	†	1.29	2.12	†	0.970
Predicted Waxy Crystal Deposit, g/D										
By molecular diffusion	0.0195	0.0248	0.0146	0.00763	0.00898	0.0103	0.0475	0.0962	0.0420	0.0005
By Brownian and shear dispersion	0.0899	0.0908	0.0736	0.0842	0.103	0.0275	0.296	0.137	0.0414	0.0718
Total	0.109	0.116	0.0882	0.0919	0.112	0.0378	0.343	0.234	0.0835	0.0723

\* V denotes vertical configuration; H denotes horizontal configuration; Test Series H-2 was run in a three-tube series configuration.

\*\* Tube length = 2.96 m for 4.93-mm tubes and 2.83 m for 10.21-mm tubes.

† Deposition rate too low to measure quantitatively.

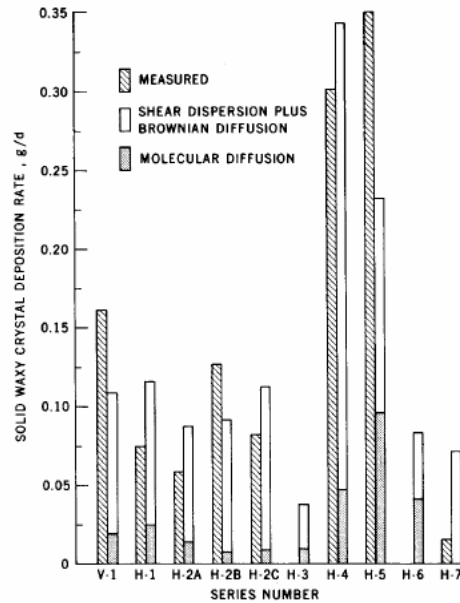


Figura 2.4: Comparação das taxas de deposição medidas experimentalmente com a previsão das equações propostas [5].

Referindo-se aos testes realizados em condições de fluxos de calor nulos em que a difusão molecular não acontece, Burger et al, [5] visualizaram uma camada muito fina com uma taxa de deposição inferior ao estimado pela equação 2.3. Este resultado é mostrado na Figura 2.4 apresentada na serie H-7. Assim, da visualização da desprezível camada de parafina mencionada, eles concluíram que é provável que muito pouca ou nenhuma deposição seja causada em condições de fluxo zero.

### 2.4.3. Weingarten et al., 1988

Weingarten et al. [31] fizeram um estudo de deposição de parafinas com a finalidade de estimar as condições críticas de operação de um duto e as taxas de deposição geradas. Os experimentos realizados para escoamento com baixas taxas de cisalhamento resultaram em medições de depósito maiores do que o previsto por difusão molecular. Adicionalmente foi observado que as taxas de deposição foram maiores do que as previstas por difusão molecular, evidenciando a presença de outros mecanismos de deposição. Eles concluíram que a dispersão por cisalhamento tem a mesma importância que a deposição por difusão molecular em condições de taxas de cisalhamento baixas. A Figura

2.5 mostra seus resultados obtidos para taxas de cisalhamento baixas comparando o depósito medido com uma previsão por difusão molecular.

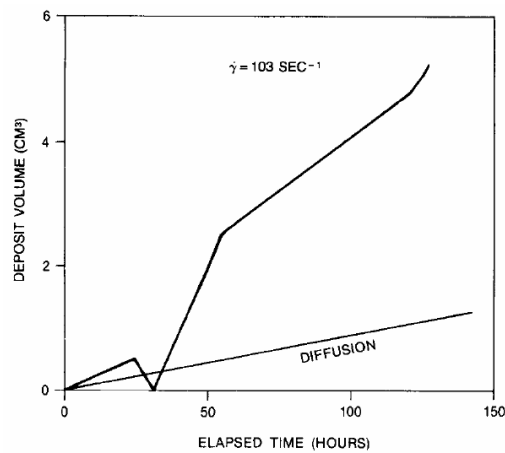


Figura 2.5: Comparação entre a deposição medida experimentalmente com uma previsão por difusão molecular para baixas taxas de cisalhamento [31].

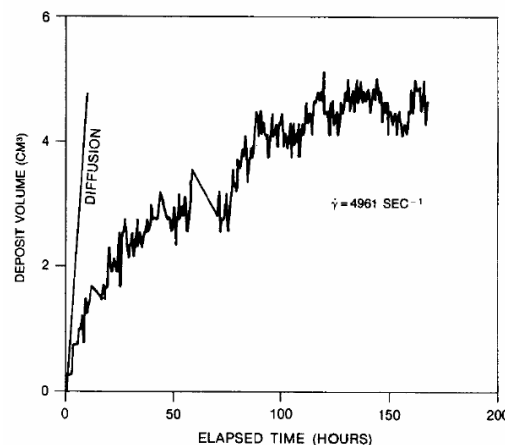


Figura 2.6: Comparação entre a deposição medida experimentalmente com uma previsão por difusão molecular para elevadas taxas de cisalhamento ainda em regime laminar [31].

Por outro lado, a Figura 2.6 mostra o resultado da experiência para condições de escoamento com altas taxas de cisalhamento. Aqui o depósito mostrou um crescimento rápido no início, aparentemente com a taxa de deposição originada pela difusão, diminuindo a taxa de deposição com o transcorrer do tempo. Nesta vazão, ainda em escoamento laminar, os cristais eram removidos quando o esforço gerado pelo cisalhamento era maior que a resistência do depósito. Conclusões como estas que revelam a presença de outros mecanismos em condições de taxas de cisalhamento baixas e remoção

de cristais em taxas de cisalhamento elevadas, servirão de comparação no capítulo de análise de resultados com algumas visualizações realizadas no presente trabalho.

#### **2.4.4. Hartley et al., 1989**

Hartley et al. [9] estudaram problemas potenciais no transporte de óleo devido ao resfriamento, tentando reproduzir em laboratório as condições de produção do campo de Troll na Noruega. Os estudos feitos para deposição de parafinas, determinaram que a deposição após a cristalização depende fortemente do número de Reynolds e da diferença de temperaturas entre o óleo escoando e a parede do duto. Eles concluíram que um elevado gradiente de temperatura aumenta as condições de precipitação, devido ao fato que o mecanismo de difusão molecular é incrementado como resultado da concentração de parafina líquida gerada pelo gradiente de temperatura. Por outro lado, em relação à vazão como variável no processo de deposição, eles afirmaram que a máxima acumulação de cristais é esperada na faixa da transição do número de Reynolds (entre 2000 e 4000). Afirmaram também que para escoamento em regime turbulento a deposição diminui e é limitada pela remoção de cristais.

#### **2.4.5. Brown et al., 1993**

Brown et al. [4] desenvolveram experimentos de deposição de parafina para períodos de tempo longos para escoamento em regime laminar. Eles compararam os resultados experimentais com simulações numéricas feitas para condições de operação de uma linha submarina e o reinício do escoamento após uma parada.

A quantidade de parafina depositada foi estimada a partir da queda de pressão, a vazão e geometria da tubulação. O estudo do fenômeno de deposição evidenciou a diminuição das taxas de deposição para tempos longos devido à uma diminuição do fluxo de calor causado pelo efeito isolante do



depósito, somado ao aumento das taxas de cisalhamento gerado pela diminuição da área efetiva do duto.

Na análise feita sobre a relevância dos mecanismos de deposição de parafinas, eles desprezaram os mecanismos de deposição por gravidade e a difusão Browniana afirmando que não são significativas para condições de escoamento. Experiências projetadas para avaliar a influência da taxa de cisalhamento sobre o fenômeno de deposição, foram realizadas mantendo constantes a temperatura do fluido e da parede para diferentes tipos de óleo e taxas de cisalhamento. Estas experiências revelaram que a taxa de deposição decresce com o incremento da taxa de cisalhamento. Adicionalmente, em experiências realizadas para fluxo de calor nulo, não foi observada deposição alguma. Assim, considerando que o único mecanismo atuante nestas condições é a dispersão por cisalhamento, eles concluíram que este mecanismo não contribui positivamente ao fenômeno de deposição. Por esta razão, o modelo numérico por eles desenvolvido foi baseado no mecanismo de difusão molecular.

#### **2.4.6. Hsu et al., 1994**

Hsu et al. [10] realizaram testes de deposição para condições de escoamento turbulento submetido a elevada pressão. A seção de testes foi projetada com o fim de estudar diferentes regimes de escoamento, composições de óleo e testar diferentes inibidores químicos.

Os resultados experimentais concluíram que a deposição de parafinas depende da composição do óleo, das temperaturas do óleo e da parede do duto, das condições de escoamento, da dimensão da tubulação, do seu isolamento e da pressão do sistema. Eles afirmaram que a diminuição da temperatura do óleo abaixo da temperatura do ponto de névoa aumentará a potencialidade do problema de deposição em um duto. Porém, a deposição de parafinas somente acontecerá quando a temperatura da superfície de deposição no duto estiver abaixo do ponto de névoa. Esta afirmação, apesar de não ter sido claramente explicada, contempla a possibilidade que a deposição aconteça para as três

condições de fluxo de calor (zero, positivo e negativo) sempre que ambas a temperatura do óleo e da parede estejam abaixo da TIAC.

Estudos sobre o comportamento do óleo usado submetido a temperaturas menores que o ponto de névoa revelaram que o óleo pode ainda continuar com um comportamento Newtoniano. A taxa de deposição de parafinas para os testes feitos nestas temperaturas críticas foi menor durante o comportamento Newtoniano do óleo e aumentaram ao mudar seu comportamento para pseudoplástico. Também foi concluído que o aumento da viscosidade (mudança do coeficiente de atrito) em testes feitos a baixas temperaturas resultaram em camadas menores de depósito devido ao incremento da remoção de cristais por cisalhamento.

Foram também realizados testes para avaliar o impacto da remoção de cristais por cisalhamento. No início dos testes o óleo escoando em vazões pequenas era resfriado permitindo a precipitação de cristais. O incremento da vazão, e por tanto da taxa de cisalhamento, causava a remoção de cristais reduzindo a camada depositada até atingir uma espessura de equilíbrio. Baseados nestas observações, concluíram que a deposição de parafinas pode ser reduzida significativamente em condições de escoamento turbulento.

#### **2.4.7. Hamouda et al., 1995**

Hamouda et al. [8] realizaram experiências para regimes laminar e turbulento com o objetivo de verificar a importância dos mecanismos de deposição por difusão molecular e dispersão por cisalhamento. Eles projetaram uma seção de testes com três seções diferentes dispostas em série, nas quais o fluido era submetido a diferentes condições de temperatura.

Partindo da consideração de que a difusão molecular é o mecanismo de deposição mais importante, decidiram testar a relevância da dispersão por cisalhamento para uma vazão fixa em que eles acharam previamente uma máxima taxa de deposição de cristais. Para este teste o óleo entrava na primeira seção com uma temperatura maior que o ponto de névoa. Nesta seção o óleo era resfriado até atingir uma temperatura menor que o ponto de névoa gerando

a deposição de parafinas. A temperatura de saída do óleo da primeira seção (menor que a TIAC) garantia que o óleo entrasse na segunda na presença de cristais em suspensão. Na segunda seção (a mais importante) tentava-se garantir um fluxo de calor nulo, para finalmente na terceira seção ser restabelecido o resfriamento gerando novamente a deposição de cristais. Se a dispersão por cisalhamento fosse um mecanismo relevante na deposição de parafinas, uma quantidade razoável de depósito deveria ser achada para as condições de teste da segunda seção (fluxo de calor nulo). Nesta seção de interesse, não foi visualizado depósito mensurável para condições de fluxo zero. Os autores concluíram então que a dispersão por cisalhamento não é o mecanismo responsável pelo transporte de cristais em suspensão na direção da parede, enfatizando que um fluxo nulo gera uma relativamente homogênea distribuição de cristais num duto. Hamouda et al. compartilham a mesma conclusão dada por Burger [5] na qual afirmam que a dispersão por cisalhamento poderia ser um mecanismo de transporte lateral em condições de elevadas concentrações de cristais perto da parede (geralmente causada por um resfriamento).

#### **2.4.8. Creek et al., 1999**

Creek et al. [7] projetaram experiências com o objetivo de determinar os efeitos da temperatura e da vazão sobre a taxa de deposição e as características do depósito. Eles propuseram que a deposição de parafinas é gerada na camada limite laminar para condições de escoamento turbulento, e na região de baixas velocidades para condições de escoamento laminar. Cinco diferentes técnicas foram empregadas para estimar a espessura da camada depositada (diferença de pressão, balanço de energia, variação de volume no interior da seção de testes, ultrassom e medição direta). Mesmo assim, os resultados da estimativa da espessura mostraram uma considerável dispersão, revelando que a estimativa da espessura do depósito é realmente uma tarefa difícil.

As experiências realizadas variando a diferença entre a temperatura do óleo e a da parede fria, concluíram que o fator gradiente de temperatura  $dT/dr$  é diretamente proporcional à taxa de deposição para ambos os regimes laminar e

turbulento. Os testes feitos para diferentes taxas de cisalhamento concluíram que a remoção por cisalhamento deve ter uma influencia importante quando as taxas de cisalhamento são aumentadas. A camada de depósito formada para condições de escoamento turbulento foi significativamente mais resistente e com menor conteúdo de óleo que a camada formada em condições laminares. Por outro lado, elevados gradientes de temperatura geravam camadas mais macias que os pequenos gradientes, o que foi atribuído ao fato que gradientes pequenos ocasionam somente a deposição dos componentes mais pesados. A espessura da camada de depósito para condições de escoamento laminar foi consideravelmente maior que aquela obtida para regime turbulento. Isto revela, uma vez mais, a participação do cisalhamento como possível mecanismo de remoção de depósito.

Foi realizado adicionalmente um teste para condições de fluxo nulo para avaliar a relevância do mecanismo de dispersão por cisalhamento e sua contribuição na deposição de cristais precipitados. Um teste inicial feito em condições de escoamento laminar, resultou em um depósito desprezível. O teste feito em regime turbulento nas mesmas condições de temperatura do anterior não mostrou deposição alguma. A aparente deposição achada nas condições de escoamento laminar foi atribuída a possíveis erros na medição de temperatura. Assim, poderiam ter acontecido na experiência fluxos de calor negativos não percebidos que, como é sabido, produzem a difusão molecular. Finalmente eles concluíram que em condições de fluxo de calor nulo não é produzida deposição de parafinas.

#### **2.4.9. Leiroz, 2004**

Leiroz [14] direcionou o seu trabalho para estudos de caráter fundamental buscando, mediante experimentos simples, tentar contribuir com o melhor entendimento dos mecanismos fundamentais responsáveis pela deposição de parafinas em dutos.

Suas primeiras experiências consistiram no estudo do fenômeno de deposição em cavidades com fluido estagnado. O aparato experimental usado consistiu em uma cavidade retangular, feita de vidro, com as paredes dos

extremos de cobre que atuavam como aletas condutoras, que permitiam impor um gradiente de temperatura controlado. As paredes de vidro foram projetadas com a idéia de acompanhar visualmente o fenômeno de deposição, tentando detectar alguma movimentação dos cristais devido ao gradiente de temperatura imposto. Com este aparato experimental foram testadas diferentes condições de temperaturas, obtendo-se a evolução temporal da espessura do depósito. Para estas experiências de fluido estagnado, realizadas com lentes de aumento de até 1000x vezes, não foi visualizada a movimentação de cristais na direção da parede como seria o caso da difusão Browniana. Um modelo numérico para simular estas experiências de fluido estagnado foi baseado em difusão molecular como único mecanismo de deposição. Os resultados mostraram que o modelo difusivo subestimou os perfis de deposição indicando que outros mecanismos além da difusão molecular poderiam estar agindo.

Seguindo a filosofia de estudar-se problemas com grau crescente de dificuldade, foram realizadas experiências de deposição sobre escoamento laminar. A seção de testes consistia num canal retangular com duas paredes de vidro que permitiam a visualização, e duas de cobre para controlar a temperatura. O fluido usado foi uma solução de 90% de óleo spindle e 10% de parafina comercial, com propriedades bem conhecidas. Os testes foram realizados todos com temperaturas de injeção do fluido acima do ponto de névoa submetido a diferentes condições de resfriamento. Os perfis da evolução temporal e espacial dos depósitos de parafina foram obtidos para os diferentes casos, com a finalidade de serem comparados com modelos de simulação numérica. Aparentemente foram o primeiro conjunto de dados disponível na literatura que revela em detalhe a evolução temporal e espacial dos depósitos de parafina. Os resultados obtidos nestes testes de deposição revelaram uma perfeita simetria entre as camadas de depósitos obtidos nas paredes superior e inferior do canal. A Figura 2.7 mostra o resultado referido que evidencia que os efeitos gravitacionais são realmente irrelevantes em condições de escoamento.

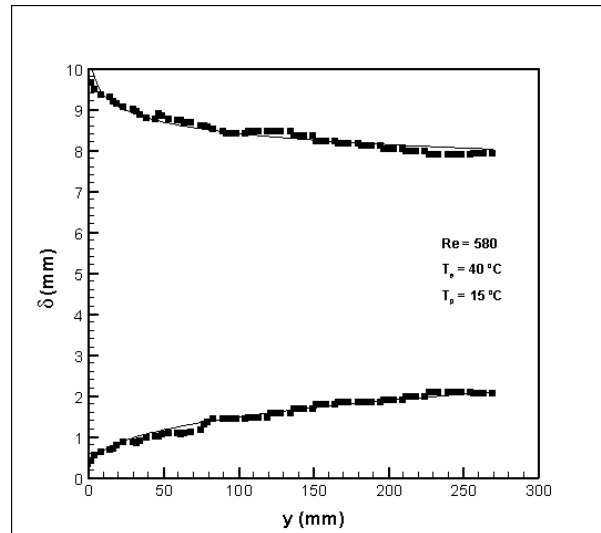


Figura 2.7: Teste para a avaliação da simetria da camada de parafina depositada nas paredes superior e inferior do canal. Temperatura de entrada 40°C. Temperatura da parede igual a 15°C. Re=580. TIAC igual a 36,6°C [14].

É importante dizer que o presente trabalho é uma continuação desta pesquisa feita por Leiroz e, como será detalhado mais a frente, foi desenvolvido utilizando seu aparato experimental projetado para condições de escoamento. Assim, como será visto no capítulo de resultados, foram repetidos alguns dos testes feitos por Leiroz tentando avaliar algumas mudanças realizadas na seção de testes utilizada no presente trabalho.

#### 2.4.10. Todi, 2005

Todi [29] desenvolveu um modelo numérico baseado em experiências realizadas com a finalidade de estudar a deposição de parafinas em condições de escoamento, e com temperaturas de injeção do óleo menores que o ponto de névoa (na presença de cristais em suspensão). A finalidade deste estudo foi avaliar os mecanismos de deposição de cristais já formados e suspensos na solução. O aparato experimental era formado por um duto circular posicionado em um ambiente, com a temperatura controlada por um termostato que possuía uma incerteza de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Este duto foi construído de acrílico para possibilitar a visualização da formação de camadas de depósito de parafina. O fluido usado foi uma mistura de querosene, óleo mineral e parafina industrial. Assim, com esta composição conseguiu que o modelo de óleo preparado apresente um

comportamento pseudoplástico quando resfriado em temperaturas menores que a TIAC. A TIAC da solução utilizada por Todi foi medida em 10,9°C.

O estudo do escoamento foi realizado utilizando a técnica de PIV (Particle Image Velocimetry), com que foram obtidos os perfis de velocidades para as diferentes condições de escoamento estudadas. Para o estudo da concentração de cristais devido ao cisalhamento foi usada uma técnica chamada *Laser Light Scattering*, que consistiu na iluminação da região de estudo da tubulação mediante um plano de luz emitido por um laser, acompanhando a visualização com uma videocâmara. Com esta técnica, Todi observou que os cristais de parafina migram para uma região anular perto da linha central da tubulação. Ao mesmo tempo ele visualizou estes cristais difundindo para regiões de menor concentração como resultado da difusão Browniana. O estudo do efeito da taxa de cisalhamento na distribuição de cristais revelou que elevadas taxas de cisalhamento ocasionavam que a concentração anular de cristais ficasse mais perto da linha central do duto. A Figura 2.8 mostra uma curva de concentração típica para uma taxa fixa de cisalhamento e para diferentes condições de temperatura do óleo. Pode ser observado que a concentração de cristais, medida em intensidade de pixels, varia em função do raio do duto. Foi concluído também que as diferentes temperaturas do fluido e as diferentes condições de fluxo de calor a que é submetido, não influenciam significativamente a distribuição de cristais na tubulação.

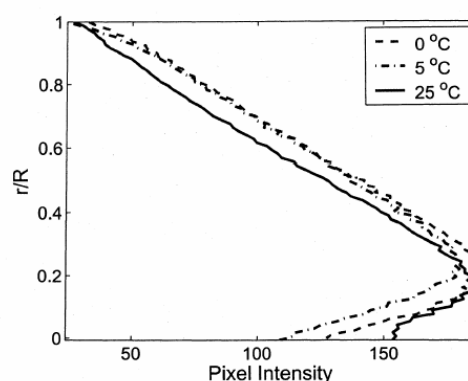


Figura 2.8: Concentração de cristais suspensos em função do raio da tubulação.  $T_e=5^\circ\text{C}$ ,  $T_p=0, 5$  e  $25^\circ\text{C}$  [29].

As experiências de deposição de parafina com temperaturas de injeção do fluido e da parede abaixo do ponto de névoa resultaram em deposição para as três condições de fluxo de calor (nulo, positivo e negativo). Para o caso de fluxo

zero e positivo, as camadas de depósito visualizadas foram muito finas e os tempos de formação de depósito para alguns casos foi de até 3 dias.

O teste realizado para fluxo de calor positivo foi projetado inicialmente com uma temperatura de injeção de 5°C e temperatura ambiente de 22°C. Esta temperatura do ambiente gerava uma temperatura da parede do duto de 13,5°C (maior que a TIAC). Para 3 dias de teste não foi achado material depositado. Um segundo teste diminuindo a temperatura do ambiente para 15°C gerou uma temperatura de parede de 9°C (menor que a TIAC), resultando em uma muito fina e homogênea camada de depósito visualizada depois de 3 dias. De ambos dos testes concluiu-se que a deposição em condições de fluxo positivo ocorre se ambos a temperatura de injeção do óleo e da parede encontram-se abaixo da TIAC.

Os testes para fluxo de calor nulo foram realizados para alta e baixa concentração de cristais. A alta concentração de cristais foi gerada com as temperaturas de injeção e do ambiente, iguais a 5°C. Com esta temperatura, uma camada visível de depósito foi achada depois de 8 h. De outro lado, o teste com baixa concentração de cristais foi feito para a temperatura de 9°C. Nestas condições, a deposição de cristais foi visualizada a jusante da tubulação na metade inferior depois do dia 3. Uma experiência adicional com maiores taxas de cisalhamento para as mesmas condições de temperatura do teste com alta concentração de cristais, não resultou em deposição para um tempo de experimento de 3 dias. Isto revelou uma vez mais que o aumento da taxa de cisalhamento pode ocasionar a remoção de cristais.

As conclusões de Todi, sobre os resultados dos testes para fluxo de calor zero, consideraram que a deposição por gravidade é um possível mecanismo responsável pelo transporte de cristais, especialmente em condições de vazões muito pequenas. Afirmou também que na ausência de difusão de parafina dissolvida devido ao fluxo de calor nulo, alguma forma de transporte de partículas na direção da parede devia ser responsável pelo depósito.

O fluxo de calor negativo foi avaliado com a temperatura de injeção de 5°C e a temperatura do ambiente de 0°C. Um depósito fino e contínuo foi visualizado após 7 h. Nestas condições, a difusão de parafina dissolvida cumpre uma função relevante devido ao gradiente de temperatura imposto. A formação de



finas camadas de depósito foi atribuída a que um material de baixa condutividade térmica como o acrílico (material do duto) gera um isolamento natural. Por outro lado, o aumento da taxa de cisalhamento para este teste resultou em camadas descontínuas de depósito, evidenciando a remoção de material depositado causado pelo aumento da vazão.

Uma reprodução parcial dos resultados obtidos das experiências realizadas por Todi, é apresentada na Tabela 2.3. Aqui são detalhadas as condições de temperatura, número de Reynolds, fluxo de calor além do resultado da experiência. É importante ressaltar que as vazões em que foram feitos os testes foram muito baixas. Os números de Reynolds mostrados na tabela evidenciam essa afirmação.

Tabela 2.3: Reprodução parcial dos resultados das experiências realizadas para condições de fluxo de calor nulo, positivo e negativo [29].

$T_{amb}$ (°C)	$T_{inj}$ (°C)	$T_{parede}$ (°C)	$Re_{calc}$	Condição	Resultados
22	5	$13,5_{>T_{IAC}}$	11,7	Fluxo positivo	Sem deposição
15	5	9,5	11,7		Depósito após 3 dias
5	5	5,2	4,3	Fluxo nulo	Depósito após 8 h
9	9	8,7	4,1		Depósito após 3 dias
5	5	5,2	88,5		Sem deposição
0	5	2,3	4,1	Fluxo negativo	Depósito após 7 h

Assim, das experiências realizadas variando-se as taxas de cisalhamento, foi concluído que um aumento da vazão gera sempre uma redução da espessura da camada de parafina depositada causada pela remoção por cisalhamento. Por outro lado, dos resultados das experiências realizadas para o estudo de concentração de cristais (Figura 2.8), o autor conclui que a dispersão por cisalhamento é um mecanismo importante e possível de estabelecer um perfil de concentração de cristais na tubulação (levando os cristais longe da parede), afirmando que este mecanismo não é responsável pelo transporte de

cristais na direção da parede. Finalmente fazendo referência aos testes para fluxos positivo e nulo, foi concluído que a deposição por efeitos gravitacionais e principalmente por difusão Browniana poderiam ser os mecanismos responsáveis pelo transporte de cristais na direção da parede.

## **2.5. Resultados relevantes**

As conclusões mais relevantes para o presente trabalho sobre a revisão da literatura detalhada, são apresentadas na Tabela 2.4. A coluna referida ao transporte de partículas indica se o autor considera ou não o transporte de cristais de parafina suspensos no escoamento na direção da parede. Na coluna do fluxo de calor são apresentadas as conclusões das experiências para condições de fluxo de calor nulo e positivo, lembrando que para o fluxo negativo o gradiente de temperatura gerado sempre ocasiona deposição por difusão molecular, desde que a parede esteja em uma temperatura menor que a TIAC. Finalmente, a coluna remoção de cristais indica se o autor considerou a remoção de cristais depositados relevante e sobre que condições.

Todos os autores aceitam que a difusão molecular (transporte de parafina na fase líquida) seja o mecanismo predominante na deposição de parafinas na presença de gradientes de temperatura no escoamento. As maiores contradições entre os autores encontram-se presentes nos estudos que procuram o esclarecimento do fenômeno de deposição de cristais suspensos no escoamento.

Dos autores que estudaram a influencia da taxa de cisalhamento no fenômeno de deposição de parafinas [7, 10, 29, 31], todos aceitaram que o aumento da mesma ocasiona a remoção de material depositado. Pesquisas mais recentes baseados em experiências que estudaram a distribuição da concentração de cristais [29], afirmam que a dispersão por cisalhamento leva os cristais suspensos para uma região anular perto da linha central do duto, não contribuindo como mecanismo de deposição. Assim, a maior parte dos pesquisadores concorda em que o cisalhamento influencia negativamente ao fenômeno de deposição de parafina.

Tabela 2.4: Principais conclusões da revisão bibliográfica realizada.

<b>Autor</b>	<b>Regime</b>	<b>Transporte de partículas na direção da parede</b>	<b>Fluxo de calor</b>	<b>Remoção de cristais</b>
Hunt	Laminar	Não é considerado	Fluxo nulo: sem deposição	
Burger et al.	Laminar	Por dispersão por cisalhamento e difusão Browniana em menor escala	Fluxo nulo: visualizou uma camada muito fina	Contraditoriamente a sua equação proposta, observou remoção de cristais para elevadas taxas de cisalhamento
Weingarten et al.	Laminar	Por dispersão por cisalhamento para taxas de cisalhamento baixas		Para taxas de cisalhamento altas em que são gerados esforços que superam a resistência do depósito
Hartley et al.	Laminar e turbulento	É máximo na transição de regime laminar para turbulento (Re de 2000 a 4000)		Para escoamento em regime turbulento
Brown et al.	Laminar	Não é considerado	Fluxo nulo: sem deposição	É incrementada como o aumento da taxa de cisalhamento
Hsu et al.	Turbulento		Fluxos nulos e positivos podem gerar deposição sempre que a temperatura do óleo e a da parede sejam menores à TIAC	É incrementada como o aumento da taxa de cisalhamento, principalmente em regime turbulento
Hamouda et al.	Laminar e turbulento	Acreditam que poderia acontecer por dispersão por cisalhamento para grandes concentrações de cristais suspensos	Fluxo nulo: sem deposição	
Creek et al.	Laminar e turbulento	Não é considerado	Fluxo nulo: sem deposição	É ocasionado pelo aumento da taxa de cisalhamento
Todi	Laminar	Principalmente por Difusão Browniana, além da deposição por gravidade para vazões muito baixas	Fluxos nulos e positivos geraram muito finas camadas de depósito para tempos longos	É ocasionado pelo aumento da taxa de cisalhamento

De outro lado, a presença de outros mecanismos de transporte de cristais na direção da parede foi continuamente mencionada com um número importante de evidências experimentais [5, 9, 31]. Porém, ainda não foi confirmado com evidências experimentais consistentes, qual ou quais são os mecanismos responsáveis pelo transporte de cristais formados e sobre que condições estes seriam relevantes.

## **2.6. Objetivo do Presente Trabalho**

A pesquisa bibliográfica realizada revelou o desconhecimento da relevância dos mecanismos de transporte de parafina na fase sólida. Assim, o objetivo do presente trabalho foi desenvolver experiências que procurem um melhor entendimento da importância dos mecanismos de transporte de cristais suspensos no escoamento. A filosofia deste estudo foi realizar experiências simples, com propriedades do fluido bem conhecidas e condições de contorno bem controladas que possam ser simulados numericamente. Com este fim, foram realizados experimentos de visualização do fenômeno de deposição para diferentes condições de fluxo de calor (nulo, positivo e negativo) com a solução óleo-parafina escoando na presença de cristais em suspensão (temperatura abaixo da TIAC). Acredita-se que este tipo de experimentos em que o fluido possui uma concentração de cristais precipitados, poderia evidenciar o transporte das partículas por algum dos mecanismos conhecidos.

Foi também parte dos objetivos, a obtenção detalhada da evolução temporal e espacial das camadas de depósito formadas, a partir das imagens de visualização registradas. Esta informação detalhada do transiente da deposição é considerada relevante para a avaliação da importância relativa dos mecanismos de deposição ao serem comparados com modelos de simulação numérica.