

2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será apresentado um resumo da bibliografia sobre deposição de parafina em dutos de transporte de petróleo, realizada até a presente data. Na maioria dos trabalhos, a solução estudada foi uma mistura de parafina em óleo, representativa de um petróleo parafínico.

Na primeira parte deste capítulo foi feita uma breve descrição das características físicas da parafina e dos mecanismos responsáveis pelo fenômeno de deposição. Em seguida, abordaremos temas como taxa de deposição, erosão da camada depositada, adesão à superfície e envelhecimento do depósito. Mostraremos uma abordagem completa das considerações feitas pelos pesquisadores, e apresentaremos algumas controvérsias.

2.1

Característica da Parafina

A denominação cru, cobre uma grande variedade de hidrocarbonetos e alcanos podendo conter parafinas, aromáticos, naftenos, resinas, asfaltenos, enfim com uma infinidade de compostos de carbono (tipicamente de C_1 a C_{60}). A parafina faz parte do grupo dos alcanos de alto peso molecular (normalmente acima do C_{18}). Existem dois tipos, as iso-parafinas e as normais parafinas, ou n-parafinas. A principal diferença é que no primeiro caso as cadeias são ramificadas e no segundo são lineares. As n-parafinas irão nos interessar particularmente, pois sob determinadas condições de temperatura, essas parafinas perdem solubilidade no cru e mudam o estado físico da solução, se tornando uma suspensão de partículas sólidas no óleo. Na Tabela 2.1 estão listadas as características físicas de alguns n-alcanos, usualmente encontradas no petróleo (dados de Freund et al. [8]).

A solubilidade da parafina decresce com a temperatura. Quando essa mudança de estado acontece em pleno escoamento do petróleo parafínico, ela pode perturbar as condições de transporte e causar deposição na parede do duto, reduzindo o diâmetro livre de escoamento. Essa redução de área

transversal faz variar as tensões viscosas no fluido e uma vez parado o escoamento pode até mesmo obstruir a tubulação. Tudo isso contribui para que as condições do escoamento sejam controladas pela deposição.

Composto	Formula	Massa Molar	Ponto de fusão a 1 atm (°C)
Etano	C ₂ H ₆	30	-183
Propano	C ₃ H ₈	44	-187
Butano	C ₄ H ₁₀	58	-138,5
Pentano	C ₅ H ₁₂	72	-129,5
Hexano	C ₆ H ₁₄	86	-94
Heptano	C ₇ H ₁₆	100	-99,5
Octano	C ₈ H ₁₈	114	-57
Nonano	C ₉ H ₂₀	128	-53,3
Decano	C ₁₀ H ₂₂	142	-29,5
Undecano	C ₁₁ H ₂₄	156	-25,5
Dodecano	C ₁₂ H ₂₆	170	-9,5
N-tetradecano	C ₁₄ H ₃₀	198	5,5
Hexadecano	C ₁₆ H ₃₄	226	18
Octadecano	C ₁₈ H ₃₈	254	28
Eicosano	C ₂₀ H ₄₂	282	36,5
Pentacosano	C ₂₅ H ₅₂	352	53,5
triacontano	C ₃₀ H ₆₂	422	66
Tetracontano	C ₄₀ H ₈₂	562	81,5
Octatetracontano	C ₄₈ H ₉₈	674	90,3
Pentacontano	C ₅₀ H ₁₀₂	702	92

Tabela 2.1: Características físicas de algumas parafinas normalmente encontradas no petróleo.

As propriedades físicas da n-parafina variam acentuadamente em função do seu número de átomos de carbono. Na Figura 2.1 está ilustrado um gráfico da variação da temperatura de solidificação de algumas parafinas em função do número de átomos de carbono Bruning et al. [4]. Essas partículas de parafina, insolúveis e dispersas na solução de carbono mais leve, uma vez precipitadas se organizam em forma de cristais e precipitam em forma de depósito. As iso-parafinas, os aromáticos, naftenos, resinas e asfaltenos contribuem menos para o processo de deposição, mas modificam consideravelmente o comportamento da cristalização Misra et al [16].

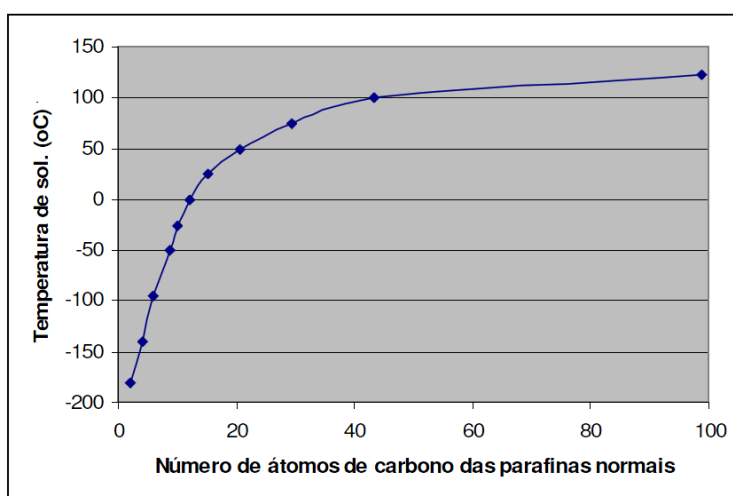


Figura 2.1: Variação da temperatura de solidificação de parafinas normais *versus* número de átomos de carbono

As condições sobre as quais o cristal cresce tem uma estreita relação com a taxa de resfriamento, a qual possibilita a existência de variadas formas de célula unitária cristalina. Tipicamente, sob baixas taxa de resfriamento, são produzidos cristais maiores e mais resistentes. Os cristais produzidos sob altas taxas de resfriamento são normalmente menores e tem maior mobilidade. Globalmente, um parâmetro importante para a determinação do estado físico da solução é a temperatura de cristalização de parafina conhecida como TIAC ou ponto de névoa.

2.2

Temperatura de Aparecimento de Cristais (TIAC)

A solubilidade da parafina cai com a temperatura, e existe uma temperatura característica de início de cristalização, TIAC, que determina o início desse processo. Seu valor é difícil de medir experimentalmente e pode variar com o método utilizado. Tipicamente, essas temperaturas são da ordem da dezena de grau Celsius.

Uma vez que a TIAC foi atingida, as cadeias de parafina saem de solução e precipitam no óleo. Precipitadas, essas cadeias se aglomeram e se organizam na forma de cristais. O início da cristalização depende da taxa de resfriamento, da composição da parafina e das condições de escoamento. Por isso a TIAC não é um valor único para todos os petróleos parafínicos, sob todas as condições externas. Algumas técnicas são utilizadas para obter esse valor em laboratório, como a microscopia, a calorimetria diferencial e viscosimetria. É importante observar, que a técnica e as condições de medida irão interferir na determinação deste valor característico.

A microscopia é uma técnica visual, utilizada como referência para a medição do crescimento de cristais. Nela é utilizado um microscópio óptico onde é possível ver o aparecimento das primeiras formações de cristal. A temperatura e taxa de resfriamento são controladas por um banho termostático. Esta técnica requer ensaios de longa duração. De alta sensibilidade, essa técnica pode identificar até os primeiros pontos de nucleação.

A calorimetria diferencial, também conhecida como DSC, é utilizada para a observação de mudança de fase sólido-líquido. Dois aquecedores independentes permitem o aquecimento-resfriamento da amostra, sob taxas controladas. O instrumento detecta a diferença do fluxo de calor absorvido pela amostra em comparação com uma amostra de referência, Plasencia et al. [20]. Este procedimento utiliza o monitoramento calorimétrico marcando um ponto base (calor sensível) e detectando um pico exotérmico devido ao aparecimento de cristais (calor latente). Essa técnica é uma técnica termodinâmica e detecta valores de cristalização para maiores tamanhos de cristal que a microscopia.

A viscosimetria também pode ser utilizada na medição da TIAC. Essa técnica consiste em medir a viscosidade da amostra a uma dada taxa de resfriamento. Medida no reômetro, aplica-se uma taxa de deformação ou uma tensão cisalhante constante e obtém-se a outra grandeza podendo-se assim

caracterizar reologicamente o fluido. Nesse caso obtém-se, para uma dada condição reológica e taxa de resfriamento, a curva da variação de viscosidade com a temperatura. O ponto de temperatura em que houver um salto de viscosidade na amostra será considerado como sendo a TIAC. A tabela 2.2 mostra as diferenças de resultados da TIAC medida com as diferentes técnicas mencionadas, para diferentes óleos.

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

Tabela 2.2: comparação entre diferentes técnicas na determinação de TIAC. Plasencia et al. [20] - Reprodução parcial.

2.3

Mecanismos de Deposição

A predição da taxa de deposição ajudaria no dimensionamento de escoamentos, ou na previsão de intervenções na produção de petróleo. Assim, um significativo esforço de pesquisa tem sido feito para o entendimento e a modelagem do problema de deposição de parafina. Esse problema é complexo e envolve vários ramos da ciência, como a termodinâmica, a transferência de calor e massa, a dinâmica dos fluidos e a reologia. Para seguir este estudo será necessário o entendimento dos mecanismos que governam a dissolução e deposição da parafina.

Burger et al. [3], Brown et al. [2], Hamouda et al.[9] fizeram importantes estudos sobre os mecanismos de deposição de parafina, tendo sido muito

citados no campo. Nestes trabalhos foram identificados alguns dos possíveis mecanismos de deposição mais importantes: a difusão molecular, difusão browniana, dispersão por cisalhamento e os efeitos gravitacionais. A seguir é apresentada uma descrição de cada um destes mecanismos.

2.3.1 Difusão Molecular

A difusão molecular é considerada como sendo o principal mecanismo responsável pelo transporte de parafina na direção da parede do duto. A difusão molecular é o transporte de massa causado por gradiente de concentração no escoamento. O óleo quente escoar no duto, que por sua vez perde calor para meio ambiente. É gerado um gradiente de temperatura entre as paredes e a mistura, na direção radial. Isso porque o óleo resfria-se em contato com as paredes resfriadas. Como a solubilidade da parafina é uma função decrescente da temperatura, o gradiente de temperatura gerado produz um gradiente de concentração na outra direção.

Desta forma, o mecanismo de difusão molecular induz o transporte de parafina na direção das paredes do tubo, onde há menor concentração de cristais em solução. Burger et al. [3] estima a taxa de transporte de parafina para a parede pela lei de Fick (Eq. 2.1) para difusão molecular como:

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

Onde:

$\frac{dm_m}{dt}$ = taxa de deposição de parafina por difusão molecular.

ρ_w = massa específica da parafina sólida.

A = área de deposição.

D_m = coeficiente de difusão da parafina líquida no óleo.

$\frac{dC}{dT}$ = coeficiente de solubilidade da parafina no óleo.

$\frac{dT}{dr}$ = gradiente radial de temperatura.

O mecanismo de difusão molecular é considerado por muitos como sendo o de maior relevância. Modelos numéricos considerando apenas este

mecanismo foram desenvolvidos por Brown et al. [2]. Entretanto, segundo Azevedo et al.[1] não existe evidência experimental suficiente para confirmar sua exclusividade na deposição em dutos.

2.3.2 Difusão Browniana

Outro mecanismo de possível transporte de parafina é a Difusão Browniana. Neste caso é a concentração de partículas sólidas que rege o processo. Em regiões do duto onde a temperatura está abaixo da TIAC existe uma maior concentração de partículas sólidas em suspensão, causando um gradiente positivo na direção da parede do duto. Estes pequenos cristais de parafina em suspensão colidem continuamente com moléculas do óleo termicamente agitadas produzindo um movimento randômico dos cristais suspensos. Na presença de uma gradiente de concentração de cristais sólidos, estes são transportados na direção de menor concentração. Este movimento é caracterizado pelo coeficiente de difusão browniana e o fluxo de partículas dado pela lei de Fick:

$$\frac{dm_b}{dt} = \rho_w A D_B \frac{dC}{dr} \quad (2.2)$$

Onde:

ρ_w = Massa específica da parafina sólida.

A = Área de deposição

D_B = Coeficiente de difusão browniana para os cristais de parafina no óleo.

C = Fração volumétrica da parafina sólida fora da solução.

r = Coordenada radial.

Um perfil de concentração esperado na seção transversal de um duto de produção offshore (onde as paredes estão resfriadas em relação à mistura) está representado na Figura 2.2. O perfil de temperatura mostrado põe em evidência o resfriamento de óleo na região próxima à parede do duto. Além disso, pode-se observar que existe um gradiente de concentração acentuado nesta região. Entretanto o ponto máximo de concentração não é a interface imediata da

parede, e sim uma linha anterior a ela na direção do centro do duto. Essa figura ilustraria a existência de dois mecanismos de transporte: um na direção central e outro na direção da parede.

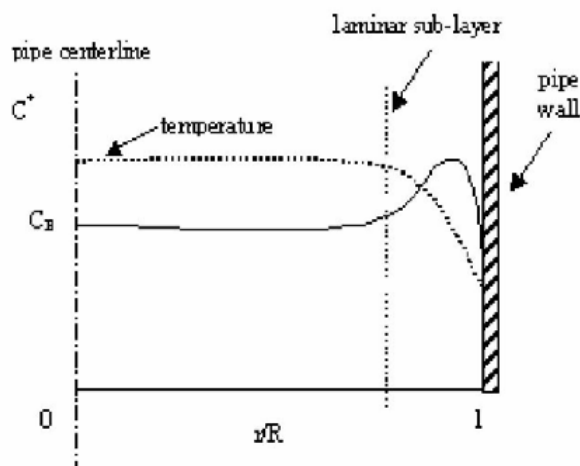


Figura 2.2: Perfil de concentração de cristais de parafina precipitados [Burger *et al*, 1981]

Leiroz et al. [14] fez estudos de deposição com fluido estagnado. A seção de teste consiste em uma cavidade retangular cujo interior é composto por aletas condutoras alimentadas por banhos termostáticos. O fluido estagnado permanece a uma temperatura acima da TIAC. Uma das paredes é resfriada e a outra permanece a uma temperatura acima da TIAC. Existe formação de cristais junto à interface tubo/mistura. Nestes experimentos foi montado um microscópio óptico com aumento de até 1000X para tentar observar o movimento de cristais. Não foi observada qualquer evidência de movimentos de cristais na direção da parede fria, como seria esperado caso a difusão browniana estivesse presente.

Este mecanismo foi desprezado em vários modelos numéricos de deposição de parafina disponíveis na literatura. No entanto, segundo Azevedo et al. [3] não existem ainda dados experimentais suficientes para desprezá-lo. Burger et al. [3], considera que a contribuição da difusão browniana é pequena comparada com outros mecanismos. Para Brown et al. [2], o mecanismo de difusão browniana não é significativo.

2.3.3 Dispersão por Cisalhamento

Assim como a difusão browniana, a dispersão por cisalhamento é um possível mecanismo de transporte lateral de partículas em suspensão, na

direção do centro do tubo. As partículas (cristais) já precipitadas sofrem um spin - movimento angular - devido à taxa de cisalhamento, induzindo um movimento circular em torno do cristal. Quando surge um grande número de cristais, este movimento rotacional é capaz de desviar a partícula de sua direção, resultando no transporte lateral das mesmas. É importante considerar que o movimento das partículas sólidas depende do tamanho de partícula, densidade relativa e concentração.

Matas et al. [16], também realizou experimentos para ilustrar o efeito do cisalhamento no escoamento com esferas em suspensão. Num escoamento de Poiseuille com esferas em suspensão, produziu-se movimento radial das esferas. Fez variar o Reynolds de escoamento, mas manteve sempre regime laminar. Ele mostrou que para um aumento do número de Reynolds a direção de transporte das partículas suspensas muda. As Figuras 2.3 e 2.4 ilustram seus resultados experimentais para $Re=67$ e $Re=350$. Em ambas as Figuras 2.3a e 2.4a, os eixos de coordenadas representam o raio interno adimensional da tubulação (parede em $r=1$). As Figuras 2.3b e 2.4b representam histogramas que mostram a probabilidade de existência de partículas em função do raio adimensional do tubo. Esses resultados ilustram a maior probabilidade de partículas próximas à parede com o aumento da vazão.

Diversos trabalhos Burger et al.[3], Weingarten and Euchner et al. [25], Leiroz et al. [14] e Plasencia et al. [20], Brown et al. [2], foram realizados com o âmbito de medir a influência da dispersão por cisalhamento na deposição de parafina. Nestes testes o fluxo de calor é nulo. É bombeada uma solução a temperatura abaixo da TIAC, e as paredes dos dutos foram mantidas isoladas ou a mesma temperatura do fluido. Considera-se assim que os cristais estarão presentes na solução, mas como o fluxo de calor radial é nulo, não haverá difusão molecular. Nestas condições a deposição só seria possível por dispersão por cisalhamento. Entretanto, todos os resultados disponíveis na literatura mostram que a deposição sob fluxo nulo é igualmente nula. Alguns autores Brown et al. [2], Creek et al [6], Todi [23] observaram que o aumento da taxa de cisalhamento provoca queda na taxa de deposição e resulta em depósitos com menores frações de parafina sólida. Estes resultados nos levam a considerar que a dispersão por cisalhamento não deve ser um mecanismo relevante na deposição de parafina.

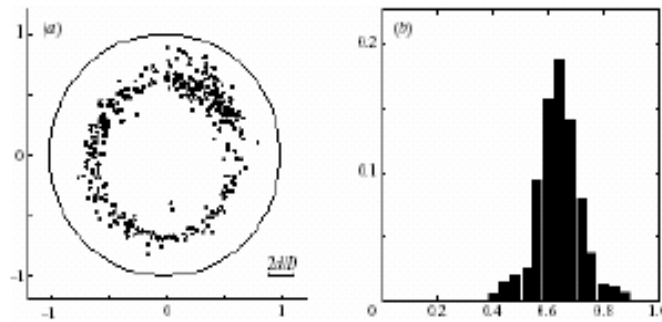


Figura 2.3: (a) Distribuição de partículas na seção transversal do duto com (b) histograma de probabilidade, para $Re=67$.

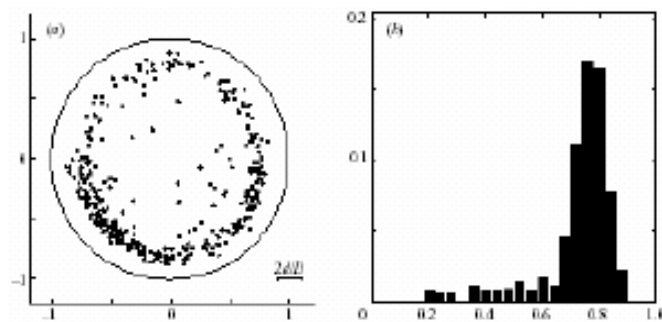


Figura 2.4: (a) Distribuição de partículas na seção transversal do duto com (b) histograma de probabilidade, para $Re=350$.

2.3.4

Deposição por Efeitos Gravitacionais

Os cristais de parafina são mais densos que o óleo circundante no duto. Assim a gravidade poderia gerar deposição de cristais na parte inferior das paredes do duto. Burger et al.[3], realizou experimentos em dutos verticais e horizontais sob as mesmas condições e o mesmo óleo, observando que a variação de quantidade de parafina depositada é insignificante. Além disso, Leiroz et al. [14] realizou estudos detalhados no laboratório de termociências da PUC-RIO que mostraram imagens do processo transiente de deposição de parafina em canais. Esses experimentos indicaram que as espessuras de depósito nas paredes superior e inferior do canal eram iguais. Pensamos que a deposição por efeitos gravitacionais não deve ser um mecanismo relevante.

2.4

Taxa de Deposição de Parafina

Os principais mecanismos de deposição citados até agora são a difusão molecular, a dispersão por cisalhamento, a difusão browniana e os efeitos gravitacionais. A difusão molecular é o mais amplamente aceito pelos pesquisadores.

Burger et al. [3], considerou que a taxa de incorporação de partículas sólidas no depósito imóvel deve ser igual à taxa de transporte destas partículas à parede. Esta taxa pode ser quantificado pela equação:

$$Flux = \rho_w(D_b + D_s) \frac{dC^*}{dy} \quad (2.3)$$

Onde:

$\frac{dC^*}{dy}$ = Gradiente de concentração radial de solução de parafina na parede do duto.

D_b, D_s = Coeficientes avaliados nas condições da parede.

ρ_r = Massa específica da solução da parafina.

Burger et al. [3] considerou em mais detalhes a cinética de incorporação de sólidos precipitados dentro da capa imóvel de depósito. Disse que a taxa de deposição deverá ser proporcional à área superficial avaliada. Se a concentração volumétrica de sólidos é baixa, as partículas não interagem e a taxa de deposição deverá ser diretamente proporcional à concentração de partículas na interface sólido-líquido. Por outro lado, se a concentração de partículas sólidas aumentar, a taxa de deposição passa a ser controlada pela velocidade do escoamento.

Se a mobilidade depende da interação de partículas sólidas com pontos específicos da interface, então a taxa de deposição será diretamente proporcional à taxa de cisalhamento na parede. A seguinte equação é proposta quando a taxa de incorporação de partículas sólidas dentro da capa imóvel é controlada pela velocidade (alta concentração de partículas sólidas próximas à parede):

$$\frac{dm_i}{dt} = k^* C_w^* \gamma A \quad (2.4)$$

Onde:

C_w^* = Fração de partículas sólidas na região da interface sólido-líquido.

γ = taxa de cisalhamento na parede.

A = Área superficial disponível.

k^* = Constante de deposição.

A taxa total de deposição por mecanismos combinados para um duto resulta da combinação de difusão molecular e a taxa de incorporação de sólidos na parede, e está dada pela seguinte equação:

$$\frac{dm_T}{dt} = \rho_w A D_m \frac{dC}{dT} \frac{dT}{dy} + k^* C_w^* \gamma A \quad (2.5)$$

Hartley et al.[10] realizou experimentos com taxa de resfriamento de 1.5°C/h, numa rampa de 46 a 4°C. Repetiu os testes para vários regimes de escoamento. Encontrou que a taxa de deposição de parafina cristalizada depende não somente da diferença de temperatura entre o fluido e a parede do duto, mas também do regime de escoamento.

Weingarten et al. [25] desenvolveu experimentos para comparar algumas previsões de experiências anteriores com dados de campo, além de quantificar o efeito da taxa de cisalhamento. Realizou três tipos de experimentos, onde compara dados feitos unicamente sob difusão com dados realizados sob escoamento (sob difusão e cisalhamento). Subtraiu os resultados de deposição sob difusão dos resultados obtidos sob escoamento (depósito total).

Viu que a taxa de deposição era função da temperatura (concentração de parafina) e da taxa de cisalhamento imposta pelo escoamento. Concluiu ainda que a curva da taxa de deposição pela taxa de cisalhamento não dependia diretamente do regime de escoamento e sim de um valor crítico de taxa de cisalhamento.

Brown et al. [2] desenvolveu experimentos em laboratório e implementou um modelo computacional para prever a taxa de deposição de parafina em dutos. Encontrou que taxa de deposição é maior em regime transiente do que

em regime permanente. Entretanto, acredita que no transiente a deposição é não uniforme e pode sofrer alterações. Sendo assim, afirma que em geral não há maiores problemas com depósitos de regime transiente do que com aqueles a regime permanente.

Hsu et al, [11] desenvolveu experimentos para medir a deposição de parafina em condições de fluxo turbulento e a altas pressões (~ 1500 psia) sob uma faixa de temperatura de 32 a 240 °F. Concluiu que quando o bruto parafínico se transforma num fluido não-newtoniano (pseudo-plástico), sob determinada temperatura, o resfriamento contínuo fará cair a tensão cisalhante no escoamento. Com isso a taxa de deposição aumentará. Constatou ainda que turbulência faz cair a temperatura sob a qual a máxima taxa de deposição ocorre. Finalmente, considerou que quando um certo nível de depósito é atingido, se a vazão aumentar muito até um valor constante, a espessura de depósito cai até atingir um valor constante.

O trabalho de Hamouda et al. [9] concluiu que a taxa de deposição cai quando se aumenta a vazão. Acredita que em determinado ponto do crescimento do depósito, o aumento da vazão produz uma tensão cisalhante tal que afeta a adesão da parafina à parede. Mostrou que acima de 5500s^{-1} de taxa de cisalhamento não há depósito.

2.5

Erosão do Depósito de Parafina por Cisalhamento

No momento que a tensão cisalhante exercida pelo o escoamento é superior às forças de adesão e coesão do depósito formado, parte deste pode ser removido e retornar para o escoamento.

Alguns autores Weingarten et al. [25], A.Hamouda et al. [9], Hsu et al.[11] observaram que a elevadas taxas de cisalhamento, ainda em regime laminar, os cristais eram removidos quando o esforço gerado pelo cisalhamento era maior que a resistência do depósito. Nestes estudos provou-se que a elevadas taxas de cisalhamento a taxa do deposição podia alcançar zero.

Plasencia et al. [20] concluiu que o aumento da taxa de cisalhamento resulta em menores camadas de parafina depositadas. Pos em evidência a presença a remoção de cristais depositados por cisalhamento.

2.6

Adesão da Camada Depositada

Um ponto importante a considerar é a adesão do depósito sólido de parafina à parede do duto. A grande maioria dos modelos de depósito propostos assume que toda a parafina precipitada que chega até a parede do duto por algum mecanismo de transporte lateral é incorporada à camada já depositada.

Hunt et al. [12] concluiu que o depósito não é preso na superfície pelas forças de adesão, mas sim pela rugosidade da superfície. Considera que a deposição de parafina é iniciada por uma nucleação direta de parafina sobre a parede do duto e que o depósito cresce por difusão molecular. Seus resultados foram consistentes em relação ao que foi observado nas experiências.

Patton et al. [19] realizou um estudo similar a Hunt et al. [12], onde caracteriza o tipo de parafina como fator de influência sob a adesão do depósito. Não vê relação entre o tipo de parafina e a rugosidade da superfície depositada. Enquanto a n-parafina, de baixo peso molecular, apresenta um depósito escorregadio, a parafina de alto peso apresenta depósitos alta adesão.

Venkatesan R. Fogler H. S. [24] destacou a taxa de deposição como fator principal no arranjo das partículas. Avaliou a influência da taxa de resfriamento nas força de coesão entre partículas e na adesão do depósito à superfície do duto. Concluiu que quanto maior a taxa de resfriamento, maior a adesão do depósito à superfície. Por outro lado, quanto menor for esta taxa, maior será a coesão entre as partículas cristalizadas.

2.7

Envelhecimento e Endurecimento do Depósito

É importante conhecer a estrutura da parafina depositada na parede do duto. Muitos pesquisadores têm verificado a existência de uma correlação entre as propriedades mecânicas e químicas do depósito e seus conteúdos de óleo e parafina. O conhecimento e a capacidade de prever as propriedades mecânicas e químicas da parafina depositada são de grande valor no projeto—de operações de remoção de depósitos de parafina.

Burger et al. [3] observou que devido ao transporte lateral e a incorporação de cristais de parafina, o depósito de parafina imóvel tem uma estrutura porosa que contem perto de 14 a 17% de cristais de parafina sólida junto com 86 a 83% de óleo, no qual o óleo líquido esta contido nesses

interstícios sólidos. A Figura 2.5 ilustra o depósito imóvel acumulado na parede de um duto.

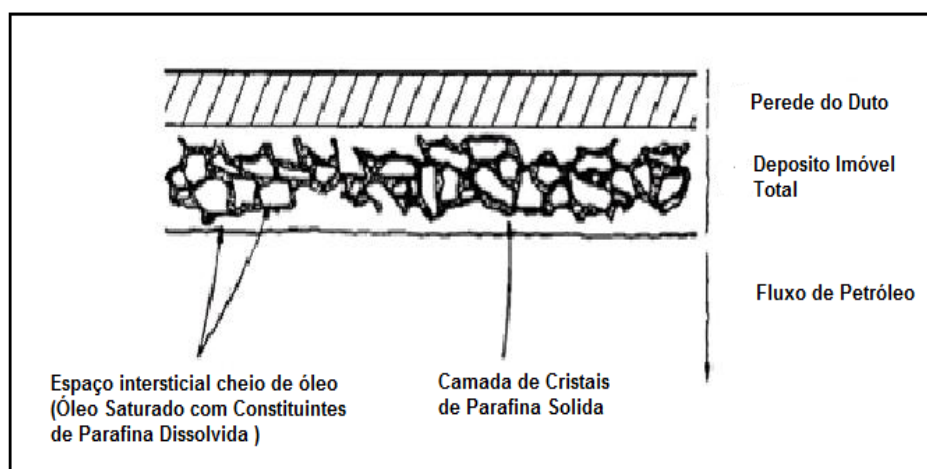


Figura 2.5: Vista da estrutura do depósito imóvel

Foi notado que depósitos formados a altas taxas de cisalhamento ficam duros e quebradiços, já depósitos formados sob baixas taxas de cisalhamento são suaves e flexíveis. Concluíram que essas diferenças são devidas aos diferentes conteúdos de óleo no depósito, já que o incremento na taxa de cisalhamento faz cair a quantidade de óleo aprisionado dentro do depósito.

Creek et al.[6] desenvolveu uma série de experimentos sobre a deposição de parafina num duto sob pressão. A espessura de depósito foi determinada utilizando 5 métodos, pressão diferencial, balanço de energia baseada na diferença de temperatura, mudança de volume interna (LDLD), ultrassom, medição direta na seção de teste.

Observou o efeito de envelhecimento do depósito para escoamentos em regime laminar e turbulento para tempos longos. Os resultados revelaram que os depósitos eram quão mais duros e compactos quão maior a vazão do escoamento; o conteúdo de óleo no depósito realizado sob fluxo turbulento foi significativamente menor que sob fluxo laminar. Além disso, verificou que os depósitos obtidos sob as mesmas condições de escoamento eram muito mais duros para testes longos quando comparado a testes de menor duração. Isso indica que além da vazão de escoamento, o tempo também é um parâmetro determinante nas condições finais do depósito.

2.8

Resultados Relevantes da Bibliografia.

Nesta seção vamos apresentar as conclusões mais relevantes sobre a revisão da literatura acima. A revisão bibliográfica apresentada nos indica que ainda existem contradições com relação aos mecanismos responsáveis pela deposição de parafina.

Vários autores Brown et al. [2], Burger et al.[3], Hamouda et al. [9] estudaram os efeitos da difusão molecular, dispersão por cisalhamento, difusão browniana além dos efeitos gravitacionais na deposição de parafina. A difusão browniana, e os efeitos gravitacionais foram desprezados pela maioria dos autores como mecanismos de transporte de parafina cristalizada. Muitos autores Brown et al. [2], Burger et al.[3] indicam que o mecanismo de difusão molecular é predominante. Entretanto, não existe, na literatura, evidência experimental para concluir que a difusão molecular seja o único mecanismo responsável pela deposição da parafina.

Estudos mais recentes Todi [23], Matas [16] afirmam que a dispersão por cisalhamento leva as partículas de parafina a uma parte anular do duto perto da linha central, e não pode ser responsável pelo transporte de partículas em direção à parede do duto.

Vários autores estudaram a remoção de cristais depositados. Consideram que a remoção cresce com a taxa de cisalhamento, sendo a força cisalhante na parede o fator principal na remoção Weingarten et al.[25], Creek et al.[6], Hsu et al. [11], Todi [23].

Além disso, alguns autores Venkatesan R. Fogler H. S. [24] consideram que em depósitos formados sob baixas taxas de resfriamento a ruptura se dê entre o depósito e o duto (ruptura das forças de adesão). Ao contrário, em depósitos formados sob altas taxas de resfriamento, a ruptura se daria entre os cristais do depósito (ruptura das forças de coesão).